



Агронаука і практика

Науково-
виробничий
журнал

Випуск 5 ● частина 3 ● 2026

Заснований 2021

Редакційна колегія:

Головний редактор:

Г. С. Коник, доктор сільськогосподарських наук, професор,
член-кореспондент НААН, Україна

Члени редколегії:

О. М. Бордун, кандидат с.-г. наук, Україна

С. О. Вовк, доктор біологічних наук,
професор, Україна

В. А. Доронін, доктор
сільськогосподарських наук, професор,
Україна

Д. Заборські, кандидат наук,
старший науковий співробітник,
Західнопоморський технологічний
університет, м. Щецин, Польща

М. О. Ільченко, кандидат с.-г. наук,
Україна

У. М. Карбівська, доктор с.-г. наук,
професор, Україна

Г. Я. Панахид, доктор с.-г. наук, Україна

Б. Пілярчик, доктор наук, професор,
Польща

Г. М. Седіло, доктор сільськогосподарських наук, професор, академік НААН, Україна

О. І. Стадницька, кандидат с.-г. наук,
Україна

О. Ф. Стасів, доктор сільськогосподарських наук, академік НААН, Україна

Е. Чернявська-Пйонтковська, доктор наук,
професор, Польща

К. Яшкуне, доктор наук, Литва

Editorial board:

Chief editor:

H. Konyk, doctor of agricultural sciences,
professor, corresponding member of the NAAS,
Ukraine

Members of the editorial board:

O. Bordun, candidate of agricultural sciences,
Ukraine

S. Vovk, doctor of biological sciences, professor,
Ukraine

V. Doronin, doctor of agricultural sciences,
professor, Ukraine

D. Zaborski, PhD, Associate Professor,
West Pomeranian University of Technology
in Szczecin, Poland

M. Ilchenko, candidate of agricultural sciences,
Ukraine

U. Karbivska, doctor of agricultural sciences,
professor, Ukraine

H. Panakhyd, doctor of agricultural sciences,
Ukraine

B. Pilarchyk, doctor of sciences, professor,
Poland

H. Sedilo, doctor of agricultural sciences,
professor, academician of the NAAS, Ukraine

O. Stadnytska, candidate of agricultural sciences,
Ukraine

O. Stasiv, doctor of agricultural sciences,
academician of the NAAS, Ukraine

E. Czerniawska-Piatkowska, doctor hab. inż.,
professor, Poland

K. Jaškūnė, doctor of sciences, Lithuania

Рекомендовано до друку
вченою радою Інституту сільського господарства
Карпатського регіону НААН,
протокол № 10 від 23 вересня 2026 р.

Реєстраційне свідоцтво
Серія КВ № 25079-15019 Р від 10.12.2021.

Засновник і видавець
Інститут сільського господарства Карпатського регіону НААН,
вул. Грушевського, 5, с. Оброшине Львівського р-ну Львівської обл., 81115

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції
ДК № 7457 від 28.09.2021 р.

Ідентифікатор в реєстрі суб'єктів у сфері медіа: **R-30-01975**

Адреса редколегії та видавництва
Інститут сільського господарства Карпатського регіону НААН,
вул. Грушевського, 5, с. Оброшине
Львівський р-н, Львівська обл., 81115
Тел./факс+38 (032) 227 97 99, 227 97 33
e-mail: inagrokarpat@isgkr.com.ua
www.isgkr.com.ua

Редакція може друкувати матеріали не поділяючи думки автора
За достовірність інформації та реклами відповідають автори і рекламодавці

Редактор, коректор, дизайн і верстка, фото обкладинки, переклад – А. В. Шелевач
Підписано до друку 23.09.2026

Формат 30×42/2
Папір ксероксний
Умовн. друк. арк. 9,8
Тираж 100 прим.



Оброшине 2026

ЗМІСТ

CONTENT

Рожко І. С., Орловський М. Й.

Глибока переробка кукурудзи: сучасний стан, основні напрями та перспективи розвитку в Україні

5

Rozhko I., orlovskiy M.

Deep processing of corn: current state, main directionsand development prospects in Ukraine

Стефанюк С. В., Ільчук Р. В.

Вплив агрокліматичних умов Західного Лісостепу на формування якості ягід технічних сортів винограду.....

13

Smefaniuk S., Ilchuk R.

Influence of agroclimatic conditions of the Western Forest-Steppe on the formationof quality of technical grape varieties

Пікіч О. П., Вишнеvsька О. В.

Вплив регулятора росту рослин, позакореневого підживлення та зрошення на врожайність і стеблоутворюючу здатність базової картоплі в умовах південного Полісся.....

21

Pikich O., Vyshnevskya O.,

Influence of growth regulator, foliar feeding, and irrigation on the yield and stem density of basic seed potatoesin the conditions of the southern Polissia

Процайло О.-Я. Я., Качмар О. Й.

Вплив систем удобрення та попередників на родючість сірого лісового ґрунту та урожайність кукурудзи на зерно у короткоротаційних сівозмінах.....

27

Protsailo O.-Y., Kachmar O.

The influence of fertilizer systems and precursors on the fertility of gray forestal soil and the yield of grain maizein short rotation crop rotations

Гангур В. В., Киричок О. О.

Вплив удобрення та системи захисту посівів на біометричні параметри рослин ячменю ярого за вирощування в умовах Лівобережного Лісостепу.....

36

Hanhur V., Kyrychok O.

Effect of fertilization and crop protection system on the biometric parameters of spring barley plants in the cultivation ...conditions of the Left-Bank Forest-Steppe

ЗМІСТ

CONTENT

<i>Дарманський А. С.</i> Динаміка накопичення нітратів у бульбах ранньостиглих сортів картоплі залежно від елементів системи удобрення.... 43	<i>Darmanskyi A.</i> Dynamics of nitrate accumulation in tubers of early-ripe potato varietiesdepending on fertilization systems
<i>Мельничук Т. В., Сендецький В. М., Курлянова І. І., Стельмах О. М.</i> Агротехнологічні основи реалізації потенціалу продуктивності гірчиці білої..... 50	<i>Melnychuk T., Sendetskyi V., Kurlyanova I., Stelmakh O.</i> Agrotechnological bases for realizing ..the productivity potential of white mustard
<i>Присяжнюк О. І., Кононюк Н. О., Шевченко Т. В.</i> Закономірності фотосинтетичної активності пшениці озимої під впливом мінерального удобрення та елементів біологізації..... 57	<i>Prysiazhniuk O., Kononiuk N., Shevchenko T.</i> Patterns of photosynthetic activity of winter wheat as affected by mineralfertilization and biologization practices
<i>Тао В., Бакуменко О. М., Дацько О. М.</i> Відбір високоадаптивних рослинних культур для керованих екологічних систем життєзабезпечення в умовах модельованого середовища..... 65	<i>Tao W., Bakumenko O., Datsko O.</i> Selection of highly adaptable crops for controlled ecological life support systems ..under simulated environmental conditions
<i>Рівіс Й. Ф., Саранчук І. І., Клим О. Я., Безалтична О. О., Стадницька О. І., Шелевач А. В., Гопаненко О. О., Тодорюк В. Б.</i> Особливості нагромадження важких металів у тканинах медоносних бджіл і бджолиній продукції..... 76	<i>Rivis Y., Saranchuk I., Klym O., Bezaltychna O., Stadnytska O., Shelevach A., Hopanenko O., Todoriuk V.</i> Features of the heavy metals accumulationin honey bees tissues and bee products

**ГЛИБОКА ПЕРЕРОБКА КУКУРУДЗИ: СУЧАСНИЙ СТАН, ОСНОВНІ НАПРЯМИ
ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ В УКРАЇНІ**Іванна РОЖКО, кандидат сільськогосподарських наук, ORCID: 0000-0001-5450-0906
Микола ОРЛОВСЬКИЙ, кандидат сільськогосподарських наук, ORCID: 0000-0001-7860-4902Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій ім. С. З. Гжицького
вул. В. Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., 80381, Україна
e-mail: ivanka_rozhko@ukr.net

У статті узагальнено сучасні наукові підходи до глибокої переробки кукурудзи як стратегічного напрямку підвищення ефективності використання зернової сировини та формування продукції з високою доданою вартістю. Визначено місце кукурудзи у сировинному забезпеченні харчової, крохмалепродуктової, біотехнологічної, біоенергетичної та хімічної промисловості. Розглянуто основні напрями глибокої переробки кукурудзи, зокрема виробництво крохмалю, модифікованих крохмалів, патоки, мальтодекстринів, глюкозо-фруктозних сиропів, біоетанолу, біополімерів, органічних кислот і супутніх продуктів комплексного використання сировини.

Розкрито технологічні особливості мокрого помелу, ферментативного гідролізу, ізомеризації, біоконверсії побічних фракцій, а також економічні й екологічні аспекти переходу від експорту зерна до виробництва продуктів з вищою доданою вартістю. Обґрунтовано, що розвиток глибокої переробки кукурудзи є важливою умовою диверсифікації аграрного експорту, зниження сировинної орієнтації зовнішньої торгівлі, підвищення конкурентоспроможності агропромислового комплексу та формування біоорієнтованої економіки.

Встановлено, що для України розширення цього сегмента потребує активізації інвестиційної діяльності, модернізації виробничої інфраструктури, розвитку промислових кластерів, гармонізації регуляторного середовища, стимулювання внутрішнього попиту на біопродукти та комплексного використання кукурудзяної сировини.

Ключові слова: кукурудза, глибока переробка, крохмаль, крохмалепродукти, глюкозо-фруктозні сиропи, біоетанол, біополімери, біоекономіка, додана вартість, агропромисловий комплекс.

Стаття з відкритим доступом на умовах ліцензії Creative Commons

Вступ

Кукурудза належить до провідних зернових культур світового землеробства та має важливе значення для продовольчої, кормової, технічної й енергетичної сфер.

Висока врожайність, універсальність використання та багатий біохімічний склад зумовлюють значний потенціал цієї культури для промислової переробки. Зерно кукурудзи є цінною сировиною для виробництва крохмалю, крохмалепродуктів, сиропів, біоетанолу, біополімерів, кормових і фармацевтичних компонентів (Mazur, V. A. et al., 2018; Bukhhalo, S. I., 2019).

За оцінками Міністерства сільськогосподарства США (United States Department of Agriculture, USDA), у маркетинговому році 2025/26 світове виробництво кукурудзи перевищило 1,26 млрд т, що підтверджує її домінуюче місце серед зернових культур як у продовольчому, так і в індустріальному використанні (USDA FAS, 2026). Для України кукурудза залишається однією з ключових експортно орієнтованих культур, однак

переважання сировинної моделі збуту обмежує економічний ефект для національного агропромислового комплексу (Kushnirenko, O. et al., 2024).

За даними Продовольчої та сільськогосподарської організації ООН (Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO), саме кукурудза забезпечила вагомую частку приросту світового виробництва зернових у 2023–2024 рр., а валовий збір цієї культури в останні роки утримується на рівні близько 1,2 млрд т (FAO, 2025).

Така масштабність формує стійкий попит не лише на аграрну сировину, а й на переробні потужності, здатні трансформувати зерно у продукти харчового, технічного та енергетичного призначення.

Актуальність проблематики посилюється під впливом глобальних тенденцій розвитку біоекономіки, декарбонізації, переходу до ресурсоефективних моделей господарювання та зростання попиту на біопродукти.

Згідно з даними Міжнародного

енергетичного агентства (International Energy Agency, IEA), саме біоенергія формує більшу частину приросту відновлюваних палив, а рідкі біопалива залишаються основним драйвером зростання у транспортному секторі; до 2030 р. розгортання відновлюваних палив суттєво прискориться внаслідок політики підтримки у США, ЄС, Бразилії, Індії та Китаї (IEA, 2024). За таких умов глибока переробка кукурудзи розглядається не лише як технологічний напрям, а й як інструмент диверсифікації аграрного експорту, зміцнення енергетичної безпеки та розширення внутрішнього ринку продуктів з високою доданою вартістю.

Наукові аспекти вирощування кукурудзи як сировинної бази для переробки висвітлено у працях вітчизняних учених, зокрема В. А. Мазура, Н. В. Шевченко, Л. А. Яковець (Mazur, V. A. et al., 2018; Shevchenko, N. V. 2018a; Shevchenko, N. V., 2018b). Технологічні питання виробництва крохмалю, модифікованих крохмалів та харчових інгредієнтів із кукурудзяної сировини розглянуто у працях С. І. Бухкало, О. Л. Гуменюк, Ю. А. Ластухіна (Bukhkalov, S. I., 2019; Humeniuk, O. L., 2019; Lastukhin, Yu. A., 2009).

Останніми роками дослідження суттєво активізувалися у напрямках фізичної модифікації крохмалю, декарбонізації біоетанольного виробництва, переробки кукурудзяних побічних продуктів у межах біорефінерій та розроблення PLA-матеріалів (Xu H. et al., 2022; Wang M. et al., 2023; da Rosa R. G. et al., 2024; Farooq M. A. et al., 2024; Khouri N. G. et al., 2024; Vacharanukrauh T. et al., 2025).

Водночас питання комплексного узагальнення технологічних, економічних та екологічних аспектів глибокої переробки кукурудзи саме в контексті розвитку агропромислового комплексу України потребує подальшого системного висвітлення. Це стосується не лише традиційних крохмалепродуктів, а й біоетанолу, біополімерів, кормових компонентів, промислових сиропів, продуктів переробки кукурудзяного волокна, а також інституційних умов формування біорефінерійних кластерів.

Метою статті є систематизація та узагальнення наукових і інформаційно-аналітичних джерел щодо технологічних, економічних та екологічних аспектів глибокої переробки кукурудзи, визначення основних напрямів її розвитку та обґрунтування перспектив розширення цього сегмента в агропромисловому комплексі України.

Матеріали і методи

Методологічною основою дослідження стали загальнонаукові та спеціальні методи пізнання. Дослідження має оглядово-аналітичний характер і ґрунтується на авторському узагальненні результатів наукових праць, статистичних матеріалів та галузевих аналітичних джерел.

У процесі роботи використано метод системного аналізу для розгляду глибокої переробки кукурудзи як багатокомпонентного напрямку сучасного агропромислового виробництва; метод узагальнення – для систематизації результатів попередніх наукових досліджень; метод порівняння – для зіставлення окремих напрямів переробки кукурудзяної сировини; контент-аналіз – для опрацювання наукових, навчальних, аналітичних і статистичних джерел; логічний та аналітичний методи – для формування висновків щодо сучасного стану та перспектив розвитку галузі.

Інформаційну базу дослідження становили наукові праці вітчизняних і зарубіжних авторів, монографії, навчальні посібники, дисертаційні дослідження, галузеві огляди, статистичні та аналітичні матеріали FAO, USDA, IEA, Renewable Fuels Association, а також сучасні статті 2022–2025 рр., присвячені вирощуванню, переробці та промислового використанню кукурудзи.

Додатково застосовано елементи економічного аналізу для оцінки значення глибокої переробки кукурудзи у формуванні доданої вартості в агропромисловому комплексі. Для цього використано підхід порівняння сировинного експорту зерна та реалізації продуктів його промислової трансформації. Елементи екологічного аналізу дали змогу зіставити потенційні переваги виробництва біоетанолу та біополімерів із ризиками, пов'язаними з енергоспоживанням, землекористуванням і вуглецевою інтенсивністю виробничих процесів.

Для поглиблення аналітичної частини статті використано також порівняльний підхід до оцінювання світових моделей розвитку глибокої переробки кукурудзи. Такий підхід дав змогу зіставити технологічну спеціалізацію, ринкові драйвери та інституційні механізми підтримки в країнах, де глибока переробка кукурудзи вже набула системного характеру, з наявними передумовами та обмеженнями в Україні.

Результати та обговорення

Кукурудза є однією з найважливіших зернових культур у світовому сільському господарстві. Її значення визначається не лише високою продуктивністю, а й широкими можливостями використання.

У світовому масштабі зерно кукурудзи спрямовується на продовольчі, кормові та технічні цілі, зокрема на виробництво крохмалю, сиропів, комбікормів, біопалива та інших продуктів промислової переробки (USDA FAS, 2026; Shevchenko, N. V., 2018b). Для України ця культура також має стратегічне значення, оскільки формує значну частину зернового експорту, але домінування експорту непереробленого зерна знижує рівень економічної віддачі від її виробництва (Kushnirenko, O. et al., 2024).

Глибока переробка кукурудзи є системою

технологічних процесів, спрямованих на максимальне використання біохімічного потенціалу зерна шляхом виділення та трансформації його основних компонентів у продукти харчового, технічного, кормового, фармацевтичного та енергетичного призначення. На відміну від первинної переробки, що обмежується виробництвом крупи, борошна чи кормових сумішей, глибока переробка формує значно вищу додану вартість і дає змогу створювати складніші виробничі ланцюги (Bukhkalov, S. I., 2019; Humeniuk, O. L., 2013).

Біохімічний склад зерна кукурудзи зумовлює її високу придатність до комплексної переробки. Кукурудза містить переважно крохмаль, а також білкові сполуки, жири, мінеральні речовини та

харчові волокна, що дає змогу отримувати широкий спектр продуктів – від нативного крохмалю до біоетанолу, органічних кислот, поліолів та біополімерів (Mazur, V. A. et al., 2018; Kognou A. L. et al., 2022). Саме тому в сучасних умовах кукурудза розглядається не лише як зернова культура, а як універсальна промислова сировина для біорефінерійного підходу (таблиця 1).

Технологічно базовою моделлю глибокої переробки кукурудзи є мокрий помел. На першому етапі зерно очищують, калібрують і піддають замочуванню, що сприяє розм'якшенню ендосперму та послабленню зв'язків між компонентами зернівки. Надалі відбувається подрібнення і сепарація з виділенням зародка, крохмалю, глютену та волокнистої фракції.

Таблиця 1. Основні напрями глибокої переробки кукурудзи та їх характеристика.

Напрямок	Основні продукти	Технологічна основа	Практичне значення
Крохмале-продуктовий	Нативний крохмаль, модифіковані крохмалі	Мокрий помел, сепарація, фізична/хімічна/ферментативна модифікація	Харчова, фармацевтична, паперова, текстильна промисловість
Сиропний	Патока, глюкозні, мальтозні та глюкозо-фруктозні сиропи, мальтодекстрини	Ферментативний гідроліз, ізомеризація, очищення та концентрування	Підсолоджувачі, технологічні інгредієнти, платформа для одержання хімічних похідних
Біо-енергетичний	Біоетанол, DDGS, CO ₂ ферментації	Сухий або мокрий помел, ферментація, дистиляція, дегідратація	Паливний компонент, енергетична безпека, кормові ко-продукти
Біо-полімерний	Молочна кислота, PLA, композити на основі крохмалю	Ферментація цукрів, полімеризація, компаундування	Біорозкладне пакування, технічні та медичні матеріали
Біо-рефінерійний	Олія, білкові концентрати, біогаз, продукти переробки волокна	Комплексна утилізація зародка, глютену, волокна та рослинних залишків	Циркулярна економіка, зменшення відходів, підвищення рентабельності

Така схема створює основу для комплексного використання всіх частин зерна і дає можливість отримувати не лише крохмаль, а й кукурудзяну олію, глютенове борошно, кормові компоненти та сировину для ферментаційних виробництв (Bukhkalov, S. I., 2019; Kushnirenko, O. et al., 2024).

Одним із базових напрямів глибокої переробки кукурудзи є виробництво крохмалю. Кукурудзяний крохмаль широко використовується у харчовій, фармацевтичній, паперовій, текстильній та будівельній промисловості. Його функціонально-технологічні властивості – здатність до набухання, клейстеризації, структуроутворення та стабілізації систем – визначають широкі можливості застосування у виробництві харчових продуктів (Humeniuk, O. L., 2019; Humeniuk, O. L., 2013). Водночас властивості нативного крохмалю не завжди відповідають вимогам сучасних технологій, що зумовлює поширення використання модифікованих крохмалів.

Модифіковані крохмалі отримують шляхом фізичної, хімічної, ферментативної або

комбінованої обробки нативного крохмалю, унаслідок чого змінюються його технологічні характеристики – температура клейстеризації, в'язкість, розчинність, стійкість до синерезису, кислот і циклів заморожування-розморожування. Сучасні дослідження підтверджують, що фізичні методи модифікації, зокрема теплово-вологісна обробка, екструзія, високий тиск і радіаційна обробка, дозволяють цілеспрямовано змінювати структуру крохмалю без використання хімічних реагентів, що відповідає вимогам «зеленої» переробки та харчової безпеки (Fargoq M. A. et al., 2024).

У харчовій промисловості модифіковані крохмалі використовують як загущувачі, стабілізатори, структуроутворювачі та носії функціональних властивостей у молочних продуктах, соусах, кондитерських виробках, консервах і напівфабрикатах (Lastukhin, Yu. A., 2009; Humeniuk, O. L., 2019). Додатковим сучасним трендом є одержання резистентного крохмалю як функціонального інгредієнта для зниження

глікемічної відповіді харчових продуктів і поліпшення їх нутритивної цінності (Fagoog M. A. et al., 2024).

Важливе місце у структурі глибокої переробки кукурудзи посідають продукти гідролізу крохмалю. До них належать патока, глюкозні та мальтозні сиропи, мальтодекстрини, поліоли та глюкозо-фруктозні сиропи. Технологічна основа їх виробництва полягає у ферментативному гідролізі крохмалю із застосуванням α -амілази та глюкоамілази, а для виробництва глюкозо-фруктозних сиропів – додатково глюкозоізомераз (Kognou A. L. M. et al., 2022). Застосування високоактивних ферментних систем і мембранних методів очищення дає змогу підвищити вихід цільових фракцій і стабільність якості кінцевого продукту.

Патока та мальтодекстрини широко використовуються у кондитерському, хлібопекарському, консервному виробництві, у дитячому харчуванні та в рецептурах продуктів зі зниженою енергетичною цінністю.

Глюкозо-фруктозні сиропи є важливим сегментом ринку рідких підсолоджувачів, а наукові огляди останніх років розглядають їх не лише як харчові інгредієнти, але й як можливу платформу для одержання похідних 5-гідроксиметилфурфуролу та інших високоцінних фуранових сполук (Kognou A. L. M. et al., 2022).

Це розширює уявлення про глибоку переробку кукурудзи як про хіміко-біотехнологічний напрям, а не тільки як про виробництво традиційних сиропів.

Інноваційним напрямом глибокої переробки кукурудзи є виробництво біоетанолу. Його роль у сучасній економіці зростає в умовах декарбонізації, розвитку альтернативної енергетики та прагнення до зменшення залежності від викопних енергоносіїв. Кукурудзяний біоетанол розглядається як відновлюване паливо, яке може зменшувати викиди парникових газів порівняно з традиційним бензином, хоча ефективність такого зменшення істотно залежить від джерел енергії, технології виробництва та системи врахування змін у землекористуванні (Xu H. et al., 2022; Vacharanukrauh T. et al., 2025).

За даними IEA, рідкі біопалива забезпечують основну частину приросту відновлюваних палив у транспортному секторі, а до 2030 р. їх споживання має зрости до 215 млрд л на рік у базовому сценарії (IEA, 2024). Галузеві матеріали Renewable Fuels Association свідчать, що саме США залишаються найбільшим світовим центром кукурудзяно-етанольного виробництва, де сформовано відпрацьовану інфраструктуру поєднання аграрного сектору, переробки, енергетики та кормового використання побічних продуктів (RFA, 2026). Для України цей досвід є важливим з огляду на необхідність формування внутрішнього ринку біопалив і диверсифікації використання кукурудзи.

Сучасні дослідження декарбонізації біоетанольного виробництва показують, що досягнення істотного скорочення вуглецевої інтенсивності потребує не лише підвищення енергоефективності, а й переходу на низьковуглецеві джерела тепла, впровадження когенерації, використання біогазу, а також уловлювання й утилізації або зберігання ферментаційного CO₂ (Xu H. et al., 2022; Vacharanukrauh T. et al., 2025). Отже, біоетанол не слід розглядати лише як паливний продукт; це компонент ширшої системи індустріальної декарбонізації.

Окремий перспективний сегмент глибокої переробки становить перетворення побічних продуктів кукурудзяної переробки. Зародок використовується для виробництва кукурудзяної олії, білкова фракція – у виготовленні кормів та концентратів, а волокно і соломисті залишки – як сировина для біорефінерійних технологій. Огляди останніх років акцентують увагу на біоконверсії кукурудзяного волокна та стеблових решток у біоетанол, біогаз, органічні кислоти, сорбенти, композити та інші високоцінні продукти, що відповідає принципам циркулярної економіки (Wang M. et al., 2023; da Rosa R. G. et al., 2024).

Перспективним нехарчовим напрямом глибокої переробки є виробництво біополімерів, зокрема полілактидної кислоти (PLA), яку одержують із крохмалевмісної сировини, у тому числі кукурудзи. PLA належить до біорозкладних полімерів і використовується у виробництві пакувальних матеріалів, одноразового посуду, виробів для 3D-друку, волокон, покриттів та окремих медичних матеріалів (Khouri et al., 2024). Саме розвиток PLA-сегмента є одним із найяскравіших прикладів переходу від традиційної крохмалепродуктової промисловості до біоорієнтованої хімії.

Наукові джерела підкреслюють, що ключовими перевагами PLA є поєднання біобазованого походження, технологічної пластичності та можливості керування властивостями через регулювання молекулярної маси, стереохімії та компаундування з іншими матеріалами (Khouri N. G. et al., 2024). Водночас для ширшого поширення PLA потрібне подальше зниження собівартості, удосконалення процесів переробки та розбудова інфраструктури компостування і збирання відходів. Для України цей напрям особливо перспективний у контексті поєднання аграрної сировинної бази з розвитком екологічно орієнтованого пакування та виробів технічного призначення.

Економічна ефективність глибокої переробки кукурудзи визначається передусім рівнем доданої вартості, який формується на кожному етапі виробничого ланцюга. У разі експорту зерна значна частина потенційного доходу переноситься до країн, що здійснюють переробку.

Натомість виробництво крохмалю, сиропів, біоетанолу, кормових ко-продуктів і біополімерів дає змогу сформувати багатокомпонентну модель доходів, підвищити зайнятість і створити мультиплікативний ефект для суміжних галузей – машинобудування, логістики, енергетики, пакувальної індустрії та тваринництва (Kushnirenko O. et al., 2024; Padhan et al., 2023).

Екологічний вимір глибокої переробки кукурудзи також є принципово важливим. З одного боку, біоетанол і біополімери можуть сприяти зменшенню використання викопних ресурсів. З іншого – екологічний ефект залежить від повного життєвого циклу продукції: агротехнологій вирощування, споживання води та енергії, джерел тепла, транспортної логістики й організації поводження з відходами. Саме тому сучасні дослідження наголошують на необхідності LCA-оцінювання і переходу до біорефінерій, де максимальна кількість побічних потоків повертається у виробництво (Xu et al., 2022; Vacharanukrauh et al., 2025).

Міжнародний досвід свідчить, що структура глибокої переробки кукурудзи істотно відрізняється залежно від поєднання сировинної бази, енергетичної політики, місткості внутрішнього ринку та промислової спеціалізації.

У США домінує інтегрована модель, у якій виробництво біоетанолу поєднується з одержанням кормових ко-продуктів, кукурудзяної олії та вуглекислого газу харчової якості; у країнах ЄС більше значення мають крохмалепродукти, спеціалізовані харчові інгредієнти та промислові біоматеріали; у Китаї й деяких країнах Південно-Східної Азії активно розвиваються сегменти органічних кислот, амінокислот і ферментаційних продуктів (IEA, 2024; Padhan S. R. et al., 2023).

Спільною рисою успішних моделей є те, що вони формуються не ізольовано, а в межах міжгалузевих ланцюгів. Переробне підприємство фактично виступає ядром агропромислової екосистеми, навколо якого концентруються виробники сировини, енергетичні оператори, транспортна інфраструктура, кормові компанії, виробники пакування та харчових інгредієнтів. Саме така мережевість знижує транзакційні витрати, забезпечує стабільне завантаження потужностей і підвищує стійкість бізнес-моделі до цінових коливань на ринку зерна.

Для України важливо враховувати, що механічне копіювання окремих закордонних рішень не є достатнім. Доцільнішою є адаптація тих інструментів, які відповідають національній структурі агровиробництва та наявній ресурсній базі. Передусім це стосується розвитку кластерів у зерновиробничих регіонах, де можна поєднати заготівлю кукурудзи, виробництво крохмалепродуктів, біоетанолу, кормових концентратів і біогазу з мінімізацією логістичних витрат.

Суттєвим уроком світової практики є також значення прогнозованої державної політики. Розвиток біоетанолу, біоматеріалів і нових хімічних платформ з кукурудзи майже завжди підтримувався цільовими програмами, податковими стимулами, вимогами до обов'язкового вмісту біокомпонентів у паливі або пріоритетами державних закупівель екологічно дружніх матеріалів. Без такого інституційного супроводу навіть наявність потужної сировинної бази не гарантує масштабного розгортання переробки.

Порівняльний аналіз показує, що найвищу стійкість демонструють саме ті системи, де розвивається не один продукт, а пакет взаємопов'язаних ко-продуктів. Якщо виробництво біоетанолу підтримується ринком DDGS, кукурудзяної олії та харчового CO₂, а крохмалепродуктові підприємства одночасно працюють із сиропами, модифікованими крохмалями та нішевими інгредієнтами, ризик залежності від одного сегмента суттєво зменшується.

Для України цей висновок є принципово важливим: ставка на одну товарну позицію може бути короткостроково вигідною, але саме багатопродуктова модель створює умови для довготривалої конкурентоспроможності.

Для України розвиток глибокої переробки кукурудзи має важливе стратегічне значення. Наявність достатньої сировинної бази, кваліфікованого науково-освітнього потенціалу та об'єктивної потреби у структурній модернізації аграрного сектору створюють сприятливі передумови для розширення цього сегмента. Разом із тим ефективне функціонування галузі потребує вирішення низки проблем: високої капіталомісткості сучасних виробництв, потреби у доступному фінансуванні, розвитку інфраструктури, гармонізації нормативної бази, забезпечення стабільного енергопостачання, а також зниження воєнних і логістичних ризиків.

Ключовою економічною проблемою є те, що переробні проекти мають довший інвестиційний цикл, ніж традиційні моделі торгівлі зерном. Будівництво сучасних крохмалепродуктових або біоетанольних потужностей потребує значних капіталовкладень у технологічне обладнання, водопідготовку, енергетичну інфраструктуру, лабораторний контроль і логістичні вузли.

Водночас саме такі об'єкти забезпечують більшу стійкість доходів у довгостроковому горизонті, оскільки диверсифікують товарний портфель і зменшують залежність від коливань експортних цін на зерно.

Не менш важливим бар'єром є нерівномірність регуляторного середовища. Для сегмента біопалив критичне значення мають правила змішування палив, акцизна політика, обіг денатурованого спирту, стандарти якості та механізми контролю походження біосировини. Для

сегмента біополімерів та біоматеріалів важливими є екологічні стандарти, вимоги до компостованості, стандарти безпечності контакту з харчовими продуктами та стимули для заміщення нафтохімічних матеріалів. За відсутності передбачуваної політики навіть технічно перспективні напрями можуть розвиватися повільно.

Разом з тим існують і суттєві можливості. По-перше, географічна концентрація виробництва кукурудзи в окремих регіонах дає змогу формувати локальні агропромислові хаби. По-друге, модернізація переробних виробництв може поєднуватися з розвитком біогазових і когенераційних установок, що знижує енергетичні витрати. По-третє, розширення переробки створює додатковий попит на науковий супровід, інженерні рішення, сервісне обслуговування та спеціалізовану підготовку кадрів. Саме тому глибоку переробку слід розглядати як інструмент не лише галузевого, а й регіонального розвитку.

Значний потенціал мають і вертикально інтегровані моделі, у яких аграрні виробники, елеваторні оператори та переробні підприємства формують довгострокові контракти на поставку сировини. Така модель важлива для зниження ризиків недозавантаження потужностей і стабілізації якості зерна, що особливо актуально для виробництва крохмалю, сиропів і біоетанолу. Для українських умов це означає потребу у розвитку коопераційних або корпоративних форматів взаємодії між первинним виробництвом і переробкою.

Подальший розвиток глибокої переробки кукурудзи пов'язаний із переходом від моделі окремих продуктів до моделі інтегрованих біорефінерій. У такій системі зерно та побічні фракції розглядаються як єдина ресурсна платформа, з якої паралельно отримують харчові інгредієнти, паливні компоненти, кормові продукти, біоматеріали та хімічні напівпродукти. Це підвищує ресурсну ефективність і зменшує залежність від

ринкової кон'юнктури одного товарного сегмента.

Одним із найбільш перспективних технологічних напрямів є розвиток процесів, що поєднують ферментативну трансформацію з мембранним очищенням, тонким фракціонуванням і цифровим контролем параметрів. Такі рішення дають змогу підвищити селективність вилучення компонентів, стабілізувати якість продукції та скоротити витрати води й енергії. Для крохмалепродуктових виробництв важливим є також впровадження систем рециркуляції води, утилізації тепла та онлайн-моніторингу реологічних властивостей проміжних продуктів.

У сегменті біоетанолу інноваційність дедалі більше визначається не самим фактом ферментації цукрів, а глибиною інтеграції процесу з енергетикою й кліматичною політикою. Поєднання етанольних заводів з біогазовими установками, системами уловлювання CO₂ і виробництвом високоцінних кормових продуктів змінює економіку галузі: біоетанольне підприємство перетворюється на багатопродуктовий енергетично-хімічний комплекс.

У сегменті біополімерів значний потенціал має розроблення нових композитів на основі PLA, крохмалю та природних волокон, а також технологій сумісності біополімерів із сучасними пакувальними лініями. Поширення такого напрямку залежить не лише від хімії та матеріалознавства, а й від формування ринку, на якому біобазовані матеріали матимуть зрозумілі конкурентні переваги завдяки регуляторним обмеженням для традиційного пластику або перевагам для екологічного пакування.

Для України стратегічним є формування кількох демонстраційних майданчиків або індустріальних кластерів, де глибока переробка кукурудзи буде поєднана з енергетичною утилізацією побічних продуктів, виробництвом кормів і локальним попитом на готову продукцію (таблиця 2).

Таблиця 2. Можливості та обмеження розвитку глибокої переробки кукурудзи в Україні

Компонент	Позитивні передумови	Основні обмеження
Сировина	Потужна база виробництва кукурудзи, концентрація посівів у зернових регіонах	Висока сезонність надходження, ризики врожайності та логістики
Технології	Наявність світових рішень для крохмалю, сиропів, біоетанолу, копродуктів	Висока вартість обладнання, залежність від імпортованих технологій
Ринки збуту	Попит на крохмалепродукти, корми, біопаливо, пакування	Недостатньо сформований внутрішній ринок окремих біопродуктів
Інституції	Можливість гармонізації з європейськими стандартами та політиками декарбонізації	Нестабільність регулювання, складні дозвільні та податкові умови
Інфраструктура	Потенціал кластеризації та інтеграції з енергетикою	Дефіцит доступного фінансування, енергетичні та воєнні ризики

Саме такі кластери можуть стати точками зростання, де відпрацьовуватимуться моделі технологічної інтеграції, стандартизації продукції,

партнерства між аграрним і промисловим бізнесом та залучення інвестицій.

Особливо перспективним видається поєднання переробки кукурудзи з цифровізацією виробничих процесів: системами моделювання рецептур сиропів, автоматичним контролем якості ферментації, енергоменеджментом і прогнозною аналітикою для завантаження обладнання.

Висновки

Глибока переробка кукурудзи є одним із стратегічно важливих напрямів розвитку агропромислового комплексу України, оскільки забезпечує формування продукції з високою доданою вартістю, підвищує ефективність використання зернової сировини та розширює функціональні можливості аграрного сектора.

Основними напрямками глибокої переробки кукурудзи є виробництво крохмалю, модифікованих крохмалів, продуктів гідролізу крохмалю, глюкозо-фруктозних сиропів, біоетанолу, біополімерів, а також супутніх кормових і технічних продуктів. Саме ці напрями формують основу сучасної крохмалепродуктової, біотехнологічної та біоенергетичної промисловості.

Сучасний науковий і галузевий досвід свідчить, що перспективи розвитку глибокої переробки кукурудзи пов'язані з поглибленням біорефінерійного підходу, розширенням використання фізично модифікованих і резистентних крохмалів, удосконаленням ферментативних систем, декарбонізацією

Такі рішення не лише знижують витрати, а й роблять виробництво більш передбачуваним, що важливо для підприємств, які працюють з експортними контрактами або зі складними специфікаціями харчових інгредієнтів.

біоетанольних виробництв та розвитком біополімерного сегмента.

Для України розширення цього сегмента потребує активізації інвестиційної діяльності, модернізації виробничої інфраструктури, упровадження інноваційних технологій, підтримки переробних кластерів, гармонізації нормативної бази з міжнародними стандартами та стимулювання внутрішнього попиту на продукти глибокої переробки. Практична реалізація такого підходу сприятиме диверсифікації аграрного експорту, зниженню сировинної орієнтації зовнішньої торгівлі та формуванню біоорієнтованої економіки.

Перспективи подальших досліджень доцільно пов'язувати з оцінюванням технологічної та економічної ефективності конкретних моделей біорефінерій на кукурудзяній сировині, визначенням оптимальної структури ко-продуктів для українських умов, а також з аналізом інструментів державної політики, здатних прискорити розвиток цього напрямку.

Список використаної літератури

Bukhkalov, S. I. (2019). General technology of the food industry in examples and problems (examples and tests on starch technology) (2nd ed., revised, Part 2). Kyiv: Center for Educational Literature. 108 p. Available at: <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/7a77a8bd-6797-4115-a491-b0d8e05fe461/content?trackerId=9b82f11793b05ef7>

Humeniuk, O. L. (2019). Food additives: lecture notes for students of specialty 181 «Food Technologies». Chernihiv: Chernihiv National University of Technology. 177 p. Available at: https://vpusp.vn.ua/wp-content/uploads/2023/01/harchovi-dobavky_teksty-lekcij.pdf

Humeniuk, O. L. (2013). Food chemistry: lecture notes for students of specialty 6.051701 «Food Technologies and Engineering». Chernihiv: Chernihiv State Technological University. 244 p. Available at: https://cpo.stu.cn.ua/Oksana/harch_himia_lekcii/470.html

Kushnirenko, O., Venger, V., Valinkevych, N., Gakhovych, N., & Bykonja, O. (2024). Prospects for corn processing for the development of the bioeconomy and decarbonization in Ukraine. *Scientific Horizons*, 27(7), 32–44. <https://doi.org/10.48077/scihor7.2024.32>

Lastukhin, Yu. A. (2009). Food additives E-codes. Structure. Production. Properties: textbook. Lviv: Center of Europe. 836 p.

Mazur, V. A., Shevchenko, N. V., & Yakovets, L. A. (2018). Agrobiological features of growing corn hybrids for bioethanol production in the conditions of the Right-Bank Forest-Steppe: monograph. Vinnytsia: LLC “Druk”. 288 p. Available at: <https://repository.vsau.org/getfile.php/34031.pdf>

Shevchenko, N. V. (2018a). Influence of technological cultivation practices on the productivity of corn hybrids for bioethanol production in the conditions of the Right-Bank Forest-Steppe (PhD dissertation in Agricultural Sciences, specialty 06.01.09). Kamianets-Podilskyi. Available at: <https://www.pdatu.edu.ua/images/naukova-miznarodna-diyalnist/svr/dissertaciya-shevchenko.pdf>

Shevchenko, N. V. (2018b). Duration of interphase periods of corn hybrid plants depending on seed treatment and foliar fertilization. *Balanced Nature Management*, (1), 73–76. Available at: <https://journals.uran.ua/bnusing/article/view/276604/271507>

da Rosa, R. G., da Rosa, L. N., Aydar, A. Y., & Rambo, M. K. D. (2024). Corn biomass as a feedstock for biorefinery: a bibliometric analysis of research on bioenergy, biofuel and value-added products. *Biofuels*,

Bioproducts and Biorefining. <https://doi.org/10.1002/bbb.2693>

Farooq, M. A., Yu, W., Guo, Y., et al. (2024). Recent advances in physical processing techniques to enhance the resistant starch content in foods: a review. *Foods*, 13(17), 2770. <https://doi.org/10.3390/foods13172770>

FAO (2025). Agricultural production statistics 2010–2024. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Available at: <https://www.fao.org/statistics/highlights-archive/highlights-detail/agricultural-production-statistics-2010-2024/en>

IEA (2024). Renewable fuels. In: Renewables 2024. International Energy Agency. Available at: <https://www.iea.org/reports/renewables-2024/renewable-fuels>

Khoury, N. G., Bahú, J. O., Blanco-Llamero, C., et al. (2024). Polylactic acid (PLA): Properties, synthesis, and biomedical applications – a review of the literature. *Journal of Molecular Structure*, 1309, 138243. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2024.138243>

Kognou, A. L. M., Shrestha, S., Jiang, Z., Xu, C. C., Sun, F., & Qin, W. (2022). High-fructose corn syrup production and its new applications for 5-hydroxymethylfurfural and value-added furan derivatives: promises and challenges. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 7(3), 148–160. <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2022.03.004>

Padhan, S. R., Jat, S. L., Mishra, P., et al. (2023). Corn for biofuel: status, prospects and implications. In: *New Prospects of Maize*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.112227>

Renewable Fuels Association (2026). 2026 Ethanol Industry Outlook. Washington, DC. Available at: <https://ethanolrfa.org/resources/annual-industry-outlook>

USDA Foreign Agricultural Service (2026). World Agricultural Production / Production – Corn. Available at: <https://www.fas.usda.gov/data/production/0440000>

Vacharanukrauh, T., Soottitantawat, A., Thongchul, N., et al. (2025). A review on comprehensive strategies for decarbonizing bioethanol production process. *Green Energy and Resources*, 100153. <https://doi.org/10.1016/j.gerr.2025.100153>

Wang, M., Zhang, T., Li, W., et al. (2023). Bioconversion of corn fiber to bioethanol. *Waste Management*, 158, 21–31. https://www.researchgate.net/publication/366597619_Bioconversion_of_corn_fiber_to_bioethanol_Status_and_perspectives

Xu, H., Lee, U., & Wang, M. (2022). Life-cycle greenhouse gas emissions reduction potential for corn ethanol refining in the USA. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 16(3), 671–681. <https://doi.org/10.1002/bbb.2348>

DEEP PROCESSING OF CORN: CURRENT STATE, MAIN DIRECTIONS AND DEVELOPMENT PROSPECTS IN UKRAINE

Ivanna ROZHKO, ORCID: 0000-0001-5450-0906
Mykola ORLOVSKYI, ORCID: 0000-0001-7860-4902

Stepan Gzhytskyi National University of Veterinary Medicine and Biotechnology of Lviv

The article systematizes modern scientific approaches to deep processing of corn as a strategic direction for increasing the efficiency of grain raw material utilization and producing high value-added products. The role of corn in the raw material supply of the food, starch-processing, biotechnological, bioenergy, and chemical industries is generalized. The main directions of deep corn processing are characterized, including the production of starch, modified starches, molasses, maltodextrins, glucose-fructose syrups, bioethanol, biopolymers, organic acids, and related products of integrated raw material utilization.

Technological features of wet milling, enzymatic hydrolysis, isomerization, and bioconversion of by-products are revealed. Economic and environmental aspects of the transition from grain export to the production of deep-processing products are highlighted. It is substantiated that the development of this segment is an important prerequisite for diversification of agricultural exports, reduction of the raw-material orientation of foreign trade, increase in the competitiveness of the agro-industrial complex, and formation of a bio-based economy.

It was established that for Ukraine the expansion of deep corn processing requires intensification of investment activity, modernization of production infrastructure, development of industrial clusters, improvement of the regulatory environment, stimulation of domestic demand for bioproducts, and implementation of the principles of integrated raw material utilization.

Keywords: corn, deep processing, starch, starch products, glucose-fructose syrups, bioethanol, biopolymers, bioeconomy, value added, agro-industrial complex.

This is an open-access article under the terms of the Creative Commons

Отримано: 31.3.2026
Погоджено до друку: 5.6.2026
Опубліковано: 30.9.2026

© С. В. Стефанюк, Р. В. Ільчук, 2026
УДК 634.8:551.58:631.5(477.8)

DOI: 10.32636/agroscience.2026-(5)-3-2

ВПЛИВ АГРОКЛІМАТИЧНИХ УМОВ ЗАХІДНОГО ЛІСОСТЕПУ НА ФОРМУВАННЯ ЯКОСТІ ЯГІД ТЕХНІЧНИХ СОРТІВ ВИНОГРАДУ

Світлана СТЕФАНЮК¹, кандидат сільськогосподарських наук, ORCID: 0000-0002-6837-9411

Роман ІЛЬЧУК², доктор сільськогосподарських наук, ORCID: 0000-0002-3524-4844

¹Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнології ім. С. З. Гжицького,
вул. Пекарська 50, м. Львів, Львівська область, 79000, Україна

²Інститут сільського господарства Карпатського регіону НААН
вул. Грушевського, 5, с. Оброшине, Львівський р-н, Львівська обл., 81115, Україна
e-mail: roman_ilchuk@ukr.net

Метою дослідження є обґрунтування впливу агрокліматичних факторів на формування якості ягід технічних сортів винограду в умовах Західного Лісостепу України, а також визначення напрямків адаптації технологій їх вирощування. Розглянуто вплив температурного режиму, опадів, суми активних температур та інсоляції на біохімічні характеристики ягід, головним чином вміст цукру, органічних кислот, а також фенольних сполук, що визначають технологічну придатність виноградної сировини. Встановлено, що вплив кліматичних факторів є інтегративним та взаємопов'язаним, що зумовило умови розвитку рослин та стабільність якості продукції. Доведено, що мінливість агрокліматичних показників у межах Західного Лісостепу диктує необхідність впровадження виноробством технологій вирощування винограду. Доведено необхідність оптимізації сортового складу, коригування водного та світлового режимів, а також використання агротехнологічних прийомів, спрямованих на підвищення стійкості виноградників до змін клімату. Узагальнення результатів дозволило сформулювати ключ до покращення якості ягід та стабільності врожаю в умовах кліматичних змін, що є передумовою для розвитку виноградарства в регіоні.

Ключові слова виноградарство, агрокліматичні фактори, якість ягід, технічні сорти винограду, цукристість, кислотність, фенольні сполуки, західний Лісостеп, адаптація технологій, кліматичні зміни.

Стаття з відкритим доступом на умовах ліцензії Creative Commons

Вступ

На тлі глобальних кліматичних змін, що відбуваються із підвищенням температури, зміною режиму зволоження та збільшенням кількості екстремальних погодних умов, питання адаптації агровиробництва до нових природно-кліматичних умов стає надзвичайно актуальним. Агрокліматичні чинники чутливі до зміни і одна з найбільш залежних від них галузей є виноградарство, оскільки формування врожайності і якості винограду значною мірою залежить від суми температурних, водних, світлових ресурсів території вирощування. У зв'язку з цим особливої уваги заслуговує вивчення особливостей впливу агрокліматичних умов окремих природно-географічних зон, зокрема західного Лісостепу України на формування якісних ознак ягід технічних сортів винограду.

Західна Лісостепова зона України характеризується відносно м'яким кліматом, достатнім зволоженням, високою мінливістю температур протягом вегетаційного періоду та специфічними ґрунтово-кліматичними умовами, які виступають як сприятливими, так і обмежувальними факторами для вирощування винограду. Поступове розширення площ виноградарства в цьому регіоні спостерігається протягом останніх десятиліть, що зумовлено як кліматичними змінами, так і зростаючим попитом на сировину у виноробній промисловості. Водночас ефективність галузі значною мірою визначається не стільки кількісними аспектами врожаю, скільки якістю ягід, яка є ключовим визначальним фактором для

органолептичних та технологічних властивостей вина.

Якість ягід технічних сортів винограду сформується під дією складного взаємодії генетичних особливостей сорту і екзогенних факторів середовища, серед яких провідна роль належить агрокліматичним умовам. Температурний режим регулює швидкість фізіологічних процесів, таких як фотосинтез, дихання та накопичення цукру, опосередковано водний режим впливає на тургор клітин, транспорт асимілянтів і концентрацію органічних кислот, а інсоляція впливає на синтез фенольних сполук і ароматичних сполук. Відносини цих факторів у конкретній області змінюються, створюючи унікальний біохімічний профіль ягід, суміжна якість кінцевого продукту.

Сучасні наукові дані свідчать про посилення впливу локальних агрокліматичних факторів формування так званого «теруару», який визначає індивідуальність сировини винограду або винопродукції. У цьому відношенні західноукраїнський Лісостеп є перспективним, але слабо вивченим виноградарським районом, що обумовлює потребу у дослідженні співвідношень кліматичних параметрів та якісних показників ягід технічних сортів. Особливу увагу необхідно приділити оптимізації асортименту, регіональній адаптації агротехнік і прогнозуванню змін якості продукції за умов кліматичної нестабільності.

Слід зазначити, що існують деякі дослідження, що стосуються впливу кліматичних

факторів на продуктивність винограду, більш загальне дослідження, зосереджене на їхньому впливі на якісні характеристики ягід в контексті західного лісостепу, досі відсутнє. Погане розуміння агрокліматичних умов та їхнього інтегративного впливу на біохімічний склад ягід обмежує потенціал управління якістю виноградної продукції.

Отже, актуальність дослідження визначається необхідністю поглиблення наукових знань про закономірності формування якості ягід технічних сортів винограду під впливом агрокліматичних факторів Західного Лісостепу України, що дозволить обґрунтувати напрямки підвищення ефективності виноградарства в регіоні та забезпечити високоякісною сировиною виноробну промисловість.

Мета дослідження полягає у виявленні закономірностей агрокліматичних умов західного Лісостепу України на формування якісних показників ягід технічних сортів винограду з метою наукового обґрунтування підвищення ефективності їх вирощування та забезпечення стабільної якості сировини для виноробної галузі.

Матеріали і методи

Польові експериментальні дослідження У дослідженні представлено комплексне дослідження впливу агрокліматичних умов на формування якості ягід технічних сортів винограду у умовах західноукраїнського Лісостепу. Декоративні властивості поверхні ягід визначалися на основі біохімічних характеристик ягід, які базувалися на параметрах регіонального клімату, включаючи тепловий режим, кількість опадів, суму активних температур та інсоляцію, а також на узагальнених результатах досліджень властивостей ягід.

Методологічною основою став системний підхід, який дозволив розглядати агрометеорологічні фактори як взаємопов'язану сукупність факторів, що впливають на умови росту та розвитку виноградної лози. У дослідженні використано загальнонаукові методи: обробку узагальнюючих наукових положень за допомогою аналізу та синтезу, порівняння для вивчення впливу ізольованих факторів, а також метод логічного аналізу для систематизації результатів.

Результати та обговорення

Формування якісних показників ягід технічних сортів винограду обумовлюється агрокліматичними умовами розвитку рослин, що включають ряд факторів, що формують умови розвитку рослин і впливають на біохімічний склад продукції. Сучасні дослідження підкреслюють, що кліматичні умови є основним елементом формування так званого терруар, що впливає на специфічні властивості виноградної сировини і її можливість для виробництва вина. Зокрема, у роботі (van Leeuwen & Destrac-Irvine, 2017) йдеться, що і

невеликі коливання температури та рівня інсоляції можуть впливати на співвідношення цукрів, кислот і фенольних сполук у ягодах. Дану позицію розділяють (Fraga et al., 2016), що демонструють агрокліматичні умови для визначення як продуктивності винограду, так і стабільності його якісних характеристик у довгостроковій перспективі.

Тепловий режим є ключовим фактором, який визначає масштаб фізіологічних процесів у виноградній лозі, таких як фотосинтез, транспірація та виробництво органічної речовини. (Arias et al., 2022) підкреслюють, що потепління повітря сприяє дозріванню ягід з накопиченням цукру, але воно також може знизити кислотність та/або змінити ароматичний профіль продукту. Розробляючи такий підхід (Rogiers et al., 2022), стверджують, що коливання температури впливають на швидкість дозрівання ягід і, отже, на технологічну зрілість ягід. Відносно помірний температурний режим типовий для західної частини Лісостепу в Україні, але очікується, що річна мінливість режиму призведе до стабільності якості ягід, що підтверджено регіональними дослідженнями.

Водний режим, що формується за рахунок кількості і розподілу опадів, є другорядним на формування якості ягід винограду. У (Peng et al., 2022) було показано, що водний режим безпосередньо впливає на концентрацію біохімічних компонентів у ягодах, зокрема цукрів та фенольних сполук. Надлишок опадів у період дозрівання призводить до розведення соку клітин і погіршення якості продукції, у той час, як помірний дефіцит води підсилює синтез сухих речовин. У (Vršić et al., 2024) також підкреслюється, що помірний водний стрес може покращувати якість ягід внаслідок підвищеної концентрації біохімічних компонентів. Для західного Лісостепу характерний помірний клімат із достатньою кількістю опадів, проте їх нерівномірний розподіл і нестабільна якість винограду.

Накопичення активних температур є інтегральним показником теплових умов на певній території та визначає можливість завершення всіх фенологічних стадій розвитку винограду. Також було показано, що значення (Jaster et al., 2024) є критичним фактором регіональної придатності для виробництва винограду, оскільки воно впливає на швидкість дозрівання ягід та кількість цукрів, які вони можуть накопичувати. Було виявлено, що зміни теплового режиму також можуть суттєво впливати на біохімічний склад ягід (Mesa et al., 2024), змінюючи співвідношення основних компонентів якості. Для Західного Лісостепу сума активних температур все ще знаходиться на межі оптимальних значень, що призводить до сильної залежності якості продукції від кліматичних коливань.

Таблиця 1. Систематизація агрокліматичних факторів та їх прикладний вплив на формування якості ягід технічних сортів винограду в умовах західного Лісостепу України

Агрокліматичний фактор	Кількісні параметри (для регіону)	Період критичного впливу	Біохімічний вплив на ягоди	Вплив на технологічні показники	Ризики відхилень	Практичні заходи регулювання
Температурний режим	Середньодобова t° : $+16 - +22^{\circ}\text{C}$; сума активних температур: $2500-3000^{\circ}\text{C}$	Веgetація, особливо фаза дозрівання	Прискорює синтез цукрів, знижує кислотність, впливає на ароматичні сполуки	Визначає цукристість (18-24%), кислотність (5-9 г/л), баланс смаку	Перегрів - втрата кислотності; холод - недозрівання	Вибір адаптованих сортів, регулювання листового покриву, мульчування ґрунту
Кількість опадів	500-650 мм/рік; у вегетацію 300-400 мм	Цвітіння, налив ягід, дозрівання	Надлишок знижує концентрацію цукрів і фенолів; дефіцит підвищує їх концентрацію	Впливає на щільність ягоди, екстрактивність, вміст сухих речовин	Надлишок - розтріскування ягід, грибові хвороби; дефіцит - стрес рослин	Дренаж, крапельне зрошення, регулювання міжрядного покриву
Сума активних температур	$>10^{\circ}\text{C}$: 2500-3000 $^{\circ}\text{C}$	Весь вегетаційний період	Забезпечує накопичення цукрів, формування кислотного балансу	Визначає рівень зрілості ягід та потенційну якість вина	Недостатність - низька цукристість; надлишок - дисбаланс кислот	Оптимізація строків збору, підбір сортів за термінами дозрівання
Інсоляція	1800-2200 год/рік	Дозрівання ягід	Сприяє синтезу антоціанів, танінів, ароматичних речовин	Впливає на колір, аромат і структурність вина	Надлишок - сонячні опіки; дефіцит - слабке забарвлення	Формування крони, орієнтація рядів, контроль густоти насаджень
Вологість повітря	60-75%	Веgetація, особливо цвітіння	Впливає на транспірацію та водний баланс рослин	Опосередковано впливає на накопичення цукрів	Висока - розвиток грибкових хвороб; низька - стрес	Захист рослин, вентиляція насаджень
Тривалість вегетаційного періоду	160-180 днів	Повний цикл розвитку	Визначає можливість повного дозрівання ягід	Впливає на стабільність якості врожаю	Скорочення - недозрівання	Підбір ранніх
Екстремальні погодні явища	Заморозки, посухи, зливи	Ранні фази росту, дозрівання	Порушують фізіологічні процеси	Погіршують якість та товарність ягід	Втрата врожаю, деградація якості	Антистресові технології, укриття, агротехнічні заходи

Джерело: побудовано та узагальнено авторами на основі (Arias et al., 2022; Fraga et al., 2016; Jaster et al., 2024; Lyashenko et al., 2024; Peng et al., 2022; Rogiers et al., 2022; van Leeuwen et al., 2024; Vršić et al., 2024).

Інсоляція як фактор світлопостачання впливає на швидкість фотосинтезу, а також на швидкість синтезу вторинних метаболітів, що визначають якість винограду. У дослідженні (Cataldo et al., 2023) підкреслюється той факт, що сонячна радіація безпосередньо впливає на накопичення фенольних сполук, колір, смак та аромат ягід. На додаток, у роботі (Dominguez et al., 2024) повідомляється, що збільшення інсоляції може покращити якість продукції, доки стрес для рослин не стане занадто сильним, особливо в поєднанні з високими температурами. Умови західного Лісостепу характеризуються достатньою

інсоляцією, але сезонні коливання впливають на стабільність якості ягід.

Дані результати аналізу наукових джерел підтверджують, що температурний режим, сума опадів, сума активних температур та інсоляція мають взаємовплив у формуванні якості ягід технічних сортів винограду. Як декларувалося у (van Leeuwen et al., 2024) – ця взаємозалежність є унікальністю виноградної продукції та конкурентоспроможністю. Для умов Західного Лісостепу України актуальним є системний підхід оцінки агрокліматичних чинників, який дає змогу

врахувати синергетичний вплив і підвищити якість виноградної сировини

Аналіз узагальнених у таблиці параметрів агроклімату дає можливість стверджувати про визначальну роль температурного режиму як базового фактора формування якісних ознак ягід технічних сортів винограду, оскільки саме він регулює швидкість біохімічних процесів, зокрема накопичення цукрів та трансформацію органічних кислот, що має прямий вплив на технологічну придатність сировини. Одночасно показано, що оптимальність температурних режимів не може розглядатися як фактор, що діє в ізоляції від водного режиму, який визначається запасами та розподілом опадів і формує концентровані особливості клітинного соку ягід.

Водночас інтегративним показником теплового забезпечення території є сума активних температур, що визначає можливість повного проходження фенологічних фаз розвитку винограду і досягнення оптимального рівня зрілості ягід. Для досліджуваного регіону показано, що значення даної величини знаходиться на кордонах оптимальних значень, що зумовлює високу чутливість якості продукції до кліматичних флуктуацій і вимагає ретельного підбору сортів за відповідною тривалістю вегетаційного періоду.

Інсоляція розглядається як фактор, що сприяє синтезу фенольних та ароматичних сполук, що визначають органолептичні властивості виноградної продукції. Сонячна радіація західного лісостепу достатня для отримання високоякісної сировини, проте сезонні коливання сонячної радіації змушують коригувати просторову структуру плантації та світловий режим.

Комплексне дослідження підтверджує, що агрокліматичні умови впливають не поодинокі, а у взаємодії, сприяючи формуванню синергетичного ефекту, який визначає якість кінцевих ягід винограду. Це виправдовує застосування інтегрованого підходу для оцінки агрокліматичних умов та розробки адаптивних технологій вирощування, що дають змогу скоротити негативний вплив кліматичних ризиків та забезпечити стабільність якісних показників продукції у середовищі змін клімату.

Біохімічні та технологічні характеристики ягід технічних сортів винограду формуються під впливом взаємодії агрокліматичних факторів, яка задає інтенсивність фізіологічних процесів, синтезу органічних сполук та кінцевої якості сировини винограду. У світлі сучасних наукових досліджень доведено, що клімат є суттєвим фактором, що визначає співвідношення базових складових якості ягід, таких як вміст цукрів, органічних кислот і фенольних сполук, які вважаються основними параметрами для виноробної галузі. Як зазначено у (van Leeuwen & Destrac-Irvine, 2017), температуру і світло сприяли безпосередній вплив на накопичення

цукру і деградацію кислот, а також на баланс смакових компонентів ягід.

Температурний режим є одним з ключових факторів метаболізму рослин винограду. У (Arias et al., 2022) вказується, що збільшення температури збільшує темпи фотосинтезу і зростання цукрів в ягодах, але також спричинює значне руйнування органічних кислот. Аналогічні результати отримано у (Rogiers et al., 2022), де звертається увага на те, що на співвідношення цукристості та кислотності технологічних характеристик виноматеріалів може впливати вплив високих температур в період дозрівання ягід. Водночас (Fraga et al., 2016) вказують, що коливання температури можуть призводити до біохімічної нестабільності ягід, особливо в регіонах з крайніми кліматичними значеннями, до яких відносять західний Лісостеп України.

Формування водного режиму внаслідок кількості та характеру опадів сильно впливає на концентрацію біохімічних компонентів у виноградних ягодах. У роботі (Peng et al., 2022) було показано, що оптимальна доступність води призводить до рівномірного розвитку рослин, але надлишок води спричиняє зниження концентрації цукру та фенолів через розрідження клітинного соку. Повідомляється (Vršić et al., 2024), що помірний дефіцит води у виноградних лозах призводить до вищої концентрації цукру та поліфенолів, що сприяє кращій якості винограду. Таким чином, оптимальний водний статус має велике значення для отримання високоякісних ягід обох технічних сортів винограду.

Теплозабезпечення рослин визначається сумою активних температур, і це впливає на швидкість проходження фенологічних стадій виноградної лози. У (Jaster et al., 2024) описано, що цей параметр є прямим наслідком вмісту цукру в ягідках, тому що вищі температури сприяють більш швидкому накопиченню вуглеводів. У (Mesa et al., 2024) показано, що підвищення суми активних температур впливає на біохімічний склад ягід, низька кислотність і зміни у синтезі фенольних сполук. Для цього технічного сорту винограду це виявлено особливо важливо, бо це впливає на те, на який тип вина вони можуть бути вжиті.

Інсоляція – це важливий фактор швидкості фотосинтезу і утворення сировинних метаболітів. У дослідженні (Cataldo et al., 2023) було виявлено, що інтенсивна сонячна радіація сприяє підвищенню вмісту фенольних сполук, таких як антоціани, що відіграють роль у колір і структура вина. Вплив інсоляції (Dominguez et al., 2024) у процесах формування аромату ягід, а відтак і органолептичних властивостей. За умов Західного Лісостепу, рівень інсоляції достатньо високий для отримання якісної виноградної сировини, хоча її варіабельність може впливати на стабільність показників.

Таблиця 2. Прикладний вплив агрокліматичних факторів на біохімічні та технологічні характеристики ягід технічних сортів винограду

Агро-кліматичний фактор	Кількісні параметри (орієнтири)	Біохімічний вплив (цукри, кислоти, феноли)	Технологічні показники (виноробство)	Прояв у технічних сортах	Ризики для якості	Практичні рекомендації
Температурний режим	20-30°C у період дозрівання; >35°C стрес	Зростання цукри (18–25%), зниження кислотність (4–7 г/л), зростання феноли при оптимумі	Потенційний спирт 10-14%, баланс смаку, структура вина	Каберне, Мерло - зростання феноли; Рислінг - втрата кислотності	Перегрів «плоскі» вина; недогрів - низька цукристість	Оптимізація листового покриву, вибір сортів за тепло-забезпеченням
Кількість опадів	300-400 мм у вегетацію; >500 мм - надлишок	Надлишок зниження цукри, зниження феноли; дефіцит зростання концентрація речовин	Впливає на екстрактивність, щільність вина, стабільність якості	Білі сорти (Шардоне) - чутливі до розбавлення; червоні - втрата кольору	Розтріскування ягід, грибкові хвороби, водянистість	Крапельне зрошення, дренаж, контроль вологості ґрунту
Сума активних температур	2500-3000°C (>10°C)	Зростання накопичення цукрів, зниження органічні кислоти	Визначає ступінь зрілості, потенціал вина	Ранні сорти - стабільні; пізні (Каберне) - ризик недозрівання	Недостатність - кислі вина; надлишок - дисбаланс	Підбір сортів, зміна строків збору врожаю
Інсоляція	1800-2200 год/рік	Зростання антоціани, зростання таніни, підвищення ароматичні сполуки	Інтенсивність кольору, ароматичний профіль, структура	Червоні сорти - глибокий колір; білі - підвищення ароматичності	Сонячні опіки ягід, деградація ароматів	Формування крони, орієнтація рядів (пн–пд), контроль густоти
Вологість повітря	60–75%	Впливає на транспірацію та накопичення цукрів	Опосередковано впливає на стабільність якості	Усі сорти чутливі до грибкових уражень	Висока вологість - хвороби, зниження якості	Захист рослин, провітрюваність насаджень
Екстремальні явища	Заморозки спека, зливи	Порушення синтезу цукрів і фенолів	Зниження якості та товарності винограду	Особливо чутливі ранні сорти	Втрата врожаю, нестабільність якості	Антистресові заходи, укриття, адаптивні технології

Джерело: побудовано та узагальнено авторами на основі (Arias et al., 2022; Cataldo et al., 2023; Dominguez et al., 2024; Fraga et al., 2016; Jaster et al., 2024; Mesa et al., 2024; Peng et al., 2022; Rogiers et al., 2022; van Leeuwen & Destrac-Irvine, 2017; van Leeuwen et al., 2024; Vrščić et al., 2024).

Розгляд впливу агрокліматичних умов на біохімічні та технологічні показники винограду має базуватися на комплексному аналізі. Як цитується у (van Leeuwen et al., 2024), саме комбінований вплив температури, доступності води та інсоляції формує унікальні теруарні властивості винограду, що слугує його конкурентоспроможним характером на ринку. Для умов західного Лісостепу України актуальним є

прийняття до відома впливу цих факторів при підборі сортів і технологій їх вирощування, що дає можливість максимального підвищення якості продукції.

Сучасний клімат врожайності змушує переглянути традиційні підходи у виноградарстві, насамперед у регіонах з прикордонними умовами для вирощування цієї культури, як це західний Лісостеп України. В літературі підкреслюється потреба у

адаптації технологій вирощування винограду до локальних агрокліматичних умов, бо саме ці умови впливають на рівень як урожайності, так і якості виноградної сировини. Як вказано у (van Leeuwen et al., 2024), зміни температурного режиму, вологозабезпечення та інсоляції підбивають основу гармонійного підходу в управлінні виноградником, які полягають у виборі сортів, методах обробітку та системах обробітку винограду. Дотримуючись аналогічної концепції, вони стверджують, що успішна адаптація до зміни клімату є основним фактором підтримки виноградарства в умовах зростаючої кліматичної мінливості (Fraga et al., 2016).

Одним із основних напрямків адаптації є оптимізація сортового складу виноградників відповідно до теплового забезпечення регіону. У (Arias et al., 2022) зазначено, що використання сортів з різною тривалістю вегетаційних періодів може компенсувати коливання теплових умов і сприяти стабільності дозрівання ягід. Для умов західного Лісостепу зареєстровано ранні та середньоранні технічні сорти, які можуть досягти оптимального рівня цукру та кислотності за обмеженого теплового або тепловодно-вітрового ресурсу. Водночас (Lyashenko, H., Buzovska, M., & Melnyk, E. B., 2024) зазначають, що врахування агрокліматичних ресурсів території є основою ефективного зонування виноградарства та підвищення продуктивності насаджень.

Ефективне управління водними ресурсами є складовою стратегій адаптації, оскільки нерівномірний розподіл дощів у Західному Лісостепу може призвести до ризику надмірного зволоження або посухи. Було показано, що застосування регульованого дефіцитного зрошення може підтримувати оптимальний рівень вмісту води в ґрунті та стабільність біохімічного складу ягід (Peng et al., 2022). З іншого боку, помірний водний стрес може бути використаний як інструмент для покращення якості винограду з точки зору концентрації цукрів та фенольних сполук, згідно з (Vršić et al., 2024). Тому необхідно, щоб адаптивні дії зосереджувалися на гнучкій модуляції водного режиму залежно від стадій росту рослин.

Також є удосконалення системи формування і заробітку крони винограду, що дає змогу регулювати світловий і температурний режими в зоні ґрунту. У (Cataldo et al., 2023) підкреслюється, що регулювання інсоляції через модифікацію структури куща призводить до збільшення вмісту фенольних сполук і якості ягід. У (Dominguez et al., 2024) повідомляється, що коригування листяного покриву зменшує негативний вплив високої температури та сонячного стресу на рослини. Для західного Лісостепу це має особливе значення, після чого перепади інсоляції можуть значно вплинути на формування якісних показників продукції.

Адаптація технологій вирощування також вимагатиме впровадження інноваційних агротехнічних заходів, спрямованих на підвищення

стійкості виноградників до кліматичних ризиків. У (Rogiers et al. 2022) зазначено, що використання антистресових методів, включаючи мульчування, застосування біостимуляторів та захист від екстремальних погодних явищ, може зменшити негативний вплив кліматичних факторів на рослини. Водночас (Jaster et al., 2024) наголошують на необхідності застосування агрометеорологічних показників для прогнозування умов вирощування та своєчасного коригування технологічних заходів.

Аналіз наукових джерел дозволяє зробити висновок, що адаптація технологій вирощування винограду до умов західного Лісостепу України повинна базуватись на інтегрованому підході з урахуванням взаємодії основних агрокліматичних факторів. У (van Leeuwen & Destrac-Irvine, 2017) вказується, що управління виноградниками в умовах кліматичних змін ефективно, коли воно ґрунтується на синтезі традиційних і новаторських підходів, націлених на покращення якості продукту та стабільності виробництва.

Аналіз узагальнених у таблиці напрямків адаптації технологій вирощування винограду дозволяє зробити висновок, що фактором підвищення якості ягід технічних сортів у західному Лісостепу України є відкритий об'єкт інтегрованого управління агрокліматичними ризиками, заснований на взаємодії сортової політики, агротехнічних заходів і інноваційних технологій моніторингу. Встановлено, що базовим рівнем біохімічного формування ягід є температурний режим і сума активних температур, тому оптимізація цих показників шляхом відбору адаптованих сортів і коригування термінів збору – це першочергова задача забезпечення стабільної якості продукції.

Водночас було продемонстровано, що водний режим має визначальний вплив на концентрацію біохімічних компонентів, оскільки саме баланс між надлишком і дефіцитом води визначає рівень цукру, фенольний склад та екстракційність ягоди. Це обґрунтовує необхідність впровадження регульованих систем зрошення та управління вологістю ґрунту як інструментів стабілізації якості виноградної сировини. Інсоляція також відіграє особливу роль, визначаючи синтез фенольних та ароматичних сполук, що характеризують органолептичні властивості продукту, і тому зумовлюють необхідність оптимізації структури насаджень та просторової локалізації вирощування винограду.

Результати дослідження показують, що мінливість клімату та зростання частоти екстремальних погодних явищ стимулюють попит на антистресові технології та адаптивне управління у сфері послуг, які допомагають зменшити вплив екзогенних факторів на рослини. Було доведено, що використання біостимуляторів, захисних заходів та передових агрометеорологічних моделей призводить до підвищення стійкості виноградників, а також до зменшення втрат врожаю.

Таблиця 3. Напрями адаптації технологій вирощування винограду до агрокліматичних умов західного Лісостепу України

Агрокліматичний виклик	Конкретні прояви в регіоні	Практичні інструменти впровадження	Очікуваний результат
Нестабільний температурний режим	Різкі коливання температур, недостатня сума тепла у окремі роки	Використання ранніх і середніх сортів, моніторинг температур	Стабільна цукристість, збалансований склад ягід
Нерівномірність опадів	Періоди надлишкового зволоження або посухи	Крапельне зрошення, дренаж, мульчування ґрунту	Оптимальний водний баланс, стабільність якості
Граничні значення суми активних температур	Недостатнє теплове забезпечення для пізніх сортів	Вибір сортів за строками дозрівання, корекція навантаження куща	Підвищення рівня зрілості ягід
Варіабельність інсоляції	Нерівномірний розподіл сонячної радіації	Формування крони, орієнтація рядів, прорідження листя	Покращення органолептичних характеристик
Підвищення кліматичних стресів	Посухи, спека, весняні заморозки	Біостимулятори, укриття, захисні сітки	Підвищення стійкості рослин
Підвищена вологість і ризик хвороб	Часті дощі у період дозрівання	Захист рослин, вентиляція насаджень	Збереження якості та товарності продукції
Кліматична мінливість у довгостроковій перспективі	Зміщення сезонів, нестабільність умов	Використання агрокліматичних моделей, цифровий моніторинг	Підвищення адаптивності виробництва

Джерело: побудовано та узагальнено авторами на основі (Arias et al., 2022; Cataldo et al., 2023; Dominguez et al., 2024; Fraga et al., 2016; Jaster et al., 2024; Lyashenko et al., 2024; Peng et al., 2022; Rogiers et al., 2022; van Leeuwen & Destrac-Irvine, 2017; van Leeuwen et al., 2024; Vršić et al., 2024).

Дослідження дає підстави стверджувати, що для ефективної адаптації технологій вирощування винограду в умовах західноукраїнського Лісостепу необхідний комплексний підхід, який передбачає оцінку взаємодії температурного, водного та

світлового режимів. Цей підхід дає стабільність врожаю, а також поліпшення якості ягід, що є визначальним фактором конкурентоздатності виноградарської продукції у виконанні сучасних змін клімату.

Висновки

За результатами дослідження слід визначити, як формування якості ягід технічних сортів винограду в умовах Західного Лісостепу України відбувалося під впливом складної взаємодії між агрокліматичними факторами, серед яких найважливішу роль відігравали температурний режим, водозабезпеченість, сума активних температур та інсоляція. Було виявлено, що ці фактори не діють ізольовано, а створюють синергетичний ефект, який визначає біохімічний склад ягід, наприклад, вміст цукру, органічних кислот та фенольних сполук, а також технологічну придатність продукції для виноробства. Особливістю досліджуваної території є те, що агрокліматичні параметри знаходяться на межі оптимальних значень, що зумовлює велику чутливість винограду до міжрічної кліматичної мінливості.

Температурний фактор визначає швидкість накопичення цукру і дозрівання ягід, тоді як концентрація біохімічних речовин, що впливають на якість продукції через механізм розбавлення або концентрації соку клітин регулюється водою, підтверджує, що температурний фактор тепла і холоду

регулюють швидкість накопичення цукру і дозрівання ягід. Було показано, що інсоляція є найважливішим чинником синтезу фенольних та ароматичних сполук, що визначають органолептичні властивості винограду, а сума активних температур визначає ступінь фізіологічної зрілості ягід. Таким чином, якість сировини винограду є наслідком інтегрованої дії всіх перерахованих факторів, але це ще раз підкреслює необхідність їх комплексного врахування у виробничій практиці.

Обґрунтовано, що підвищення якості та стабільності врожаю винограду у зоні західного Лісостепу України можливе лише шляхом адаптації технологій його вирощування до агрокліматичних умов. Серед ключових такої адаптації слід назвати оптимізацію сортового складу з урахуванням теплового режиму, застосування систем управління водним режимом, регулювання світлового середовища насаджень та використання антистресових технологій. Ефективність такого поєднання заходів мінімізує негативний вплив кліматичних ризиків і дозволяє отримати біохімічно сталі ягоди.

Список використаної літератури

Arias, L. A., Berli, F., Fontana, A., Bottini, R., & Piccoli, P. (2022). Climate change effects on grapevine physiology and biochemistry: Benefits and challenges of

high altitude as an adaptation strategy. *Frontiers in Plant Science*, 13, 835425. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.835425>

Alikadic, A., Pertot, I., Eccel, E., Dolci, C., Zarbo C., Caffarra, A., De Filippi, R., & Furlanello, C. (2019). The impact of climate change on grapevine phenology and the influence of altitude: A regional study. *Agricultural and Forest Meteorology*, 271, 73–82. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.02.030>

Cataldo, E., Eichmeier, A., & Mattii, G. B. (2023). Effects of global warming on grapevine berries phenolic compounds—A review. *Agronomy*, 13(9), 2192. <https://doi.org/10.3390/agronomy13092192>

Dominguez, D. L. E., et al. (2024). Impacts of climate change-induced temperature rise on grapevine phenology, physiology, and yield. *Plants*, 13(22), 3219. <https://doi.org/10.3390/plants13223219>

Fraga, H., García de Cortázar Atauri, I., Malheiro, A. C., & Santos, J. A. (2016). Modelling climate change impacts on viticultural yield, phenology and stress conditions in Europe. *Global Change Biology*, 22(11), 3774–3788. <https://doi.org/10.1111/gcb.13382>

Jaster, D., Tomczyk, A. M., Hildebrandt-Radke, I., & Matulewski, P. (2024). Agroclimatic indicators for grapevines in the Zielona Góra wine region (Poland) in the era of advancing global warming. *Atmosphere*, 15(6), 657. <https://doi.org/10.3390/atmos15060657>

Jones, G. V., Edwards, E. J., Bonada, M., Sadras, V. O., Krstic, M. P., & Herderich, M. J. (2022). Climate change and its consequences for viticulture. In A. G. Reynolds (Ed.), *Managing Wine Quality* (pp. 727–778). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102067-8.00015-4>

Lyashenko, H., Buzovska, M., & Melnyk, E. B. (2024). Modeling of grape yield formation by agroclimatic resources of natural zones of Ukraine. *Journal of Uman*

National University of Horticulture, 105(1), 48–57. <https://doi.org/10.32782/2415-8240-2024-105-1-48-57>

Mesa, I. F., et al. (2024). Modelling future climate change impacts on grapevine berry composition. *OENO One*, 58(4), 7789. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2024.58.4.7789>

Peng, J., et al. (2022). Effect of covering crops between rows on the vineyard microclimate, grape berry quality and wine quality. *Horticulturae*, 8(6), 518. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8060518>

Rogiers, S. Y., Greer, D. H., Liu, Y., Baby, T., & Xiao, Z. (2022). Impact of climate change on grape berry ripening: An assessment of adaptation strategies for the Australian vineyard. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1094633. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1094633>

Savina, O., Hliudzyk-Shemota, M., Sadovska, N., & Popovych, H. (2023). The impact of climate change on grape crops development in Western Ukraine. *Revista de la Universidad del Zulia*, 15(42), 37–57. <https://doi.org/10.46925/rdluz.42.03>

van Leeuwen, C., & Destrac-Irvine, A. (2017). Modified grape composition under climate change conditions requires adaptations in the vineyard. *OENO One*, 51(2), 147–154. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2016.0.0.1647>

van Leeuwen, C., Sgubin, G., Bois, B., Ollat, N., Swingedouw, D., Zito, S., & Gambetta, G. A. (2024). Climate change impacts and adaptations of wine production. *Nature Reviews Earth & Environment*, 5, 258–275. <https://doi.org/10.1038/s43017-024-00521-5>

Vrščič, S., et al. (2024). The impact of climatic warming on earlier wine-grape ripening and berry composition. *Horticulturae*, 10(6), 611. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10060611>

INFLUENCE OF AGROCLIMATIC CONDITIONS OF THE WESTERN FOREST-STEPPE ON THE FORMATION OF QUALITY OF TECHNICAL GRAPE VARIETIES

Svitlana STEFANIUK¹, ORCID: 0000-0002-6837-9411

Roman ILCHUK², ORCID: 0000-0002-3524-4844

¹Stepan Gzhytskyi National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies of Lviv

²Institute of Agriculture of the Carpathian Region of NAAS

The work is aimed at substantiating the impact of agroclimatic factors on the formation of quality parameters of technical grape varieties in the conditions of the western forest-steppe of Ukraine and identifying areas for their adaptation of the growing technology. The effect of temperature regime, precipitation, the sum of active temperatures, and solar radiation on the biochemical indices of berries, such as sugar content, acidity, and phenolic components that affect the processing suitability of grape raw materials, has been reviewed. It has been found that climate elements are interrelated and more complex when they create the development environment for the plant and determine the product quality. Variability of agroclimatic indicators within the Western Forest-Steppe has been shown to mandate adoption of agrotechnology of grape cultivation. The feasibility of rationalizing the varietal structure, controlling the water/light regimes, and utilizing agrotechnical practices conducive to enhanced vineyard tolerance to climate change was demonstrated. The synthesis of results led to the identification of essential strategies for enhancing berry quality and maintaining yield stability under climate variability, which act as enablers for sustainable viticulture in the region.

Keywords: viticulture, agroclimatic factors, berry quality, technical grape varieties, sugar content, acidity, phenolic compounds, Western Forest-Steppe, technology adaptation, climate change.

This is an open-access article under the terms of the Creative Commons

Отримано: 1.5.2026

Погоджено до друку: 7.7.2026

Опубліковано: 30.9.2026

© О. П. Пікіч, О. В. Вишневська, 2026
УДК 635.21; 633.491

DOI: 10.32636/agroscience.2026-(5)-3-3

ВПЛИВ РЕГУЛЯТОРА РОСТУ РОСЛИН, ПОЗАКОРЕНЕВОГО ПІДЖИВЛЕННЯ ТА ЗРОШЕННЯ НА ВРОЖАЙНІСТЬ І СТЕБЛОУТВОРЮЮЧУ ЗДАТНІСТЬ БАЗОВОЇ КАРТОПЛІ В УМОВАХ ПІВДЕННОГО ПОЛІССЯ

Ольга ПІКІЧ, ORCID: 0000-0003-1853-9904

Ольга ВИШНЕВСЬКА, кандидат сільськогосподарських наук, ORCID: 0000-0002-1089-6862

Інститут картоплярства НААН України

вул. Ярослава Мудрого, 22, смт. Немішаєве, Бучанський р-н, Київська обл., 07853, Україна
e-mail: pikich20@gmail.com

Одним із перспективних напрямів технологій виробництва насіннєвої картоплі високих категорій є застосування регулятора росту рослин, рідкого фосфорного добрива і позакореневого підживлення у поєднанні з сучасними системами зрошення. Регулятор росту рослин, зокрема гіберелова кислота, здатна впливати на фізіолого-біохімічні процеси в рослинах, активізувати проростання бульб, інтенсифікувати ріст надземної маси та кореневої системи, а також опосередковано регулювати процес бульбоутворення. Метою досліджень є встановлення ефективності застосування регулятора росту рослин, позакореневого фосфорного підживлення та краплинного зрошення щодо підвищення насіннєвої продуктивності базової картоплі в умовах Південного Полісся України. Використано польовий, статистичні, лабораторний, методи досліджень. Встановлено, що передсадивна обробка бульб гібереловою кислотою у нормі 50 мг/т у поєднанні з позакореневим підживленням рідким фосфорним добривом (РФД) Комбіфос у нормі 5 л/га та краплинним зрошенням забезпечили істотне підвищення врожайності. За комплексної дії агрозаходів сформовано максимальну урожайність бульб насіннєвої фракції. Урожайність зросла до 44,5 т/га у сорту Мирослава, що на 9,7 т/га більше порівняно з контролем, та до 41,6 т/га у сорту Родинна з приростом 9,3 т/га. Встановлено позитивну взаємодію досліджуваних факторів у формуванні насіннєвої продуктивності. У сорту Родинна показники стеблеутворення досяг 297,2 тис. шт./га, що на 52,4 тис. шт./га (21,4 %) більше від контролю, а у сорту Мирослава цей показник становив 265,2 тис. шт./га з приростом до контролю 37,6 тис. шт./га або 16,5 %. Отже, поєднання передсадивної обробки бульб гібереловою кислотою у нормі 50 мг/т, позакореневого підживлення рідким фосфорним добривом Комбіфос у нормі 5 л/га та краплинного зрошення на фоні локального внесення розчиненої нітроамофоски сприяє оптимізації ростових процесів рослин картоплі.

Ключові слова: картопля, насінництво, урожайність, насіннєва продуктивність, регулятор росту, позакореневе підживлення, краплинне зрошення.

Стаття з відкритим доступом на умовах ліцензії Creative Commons

Вступ

У структурі мінерального живлення сільськогосподарських культур в Україні протягом останнього десятиліття спостерігається поступове переорієнтування на використання рідких форм добрив, зокрема фосфоровмісних. Така тенденція пов'язана не лише з технологічною зручністю їх застосування, а й із можливістю більш точного дозування та рівномірного розподілу елементів живлення у прикореневій зоні. Розширення сегмента рідких фосфатних препаратів свідчить про перехід виробників до більш інтенсивних систем удобрення, хоча наявні обсяги їх використання поки що не відповідають потенційним потребам агропривиробництва.

Фосфор належить до основних макроелементів, без яких неможливе функціонування клітинного метаболізму. Його фізіологічна роль визначається участю у формуванні сполук, що забезпечують акумуляцію та перенесення енергії, а також структурну організацію клітин. Через систему фосфорилювання відбувається регуляція ферментативної активності

та контроль біосинтетичних процесів. Обмежене надходження фосфору супроводжується зниженням інтенсивності росту, затримкою розвитку та порушенням формування генеративних і запасаючих органів (Khrystenko, S. I., Makliuk, O. I., 2004; Kanivets, V. I., Tokmakova, L. M., 1997).

Незважаючи на достатній валовий вміст фосфору у більшості ґрунтів, його засвоєваність часто лімітується переходом у важкорозчинні сполуки. Доступність елемента визначається реакцією ґрунтового середовища, гранулометричним складом, гідротермічними умовами та активністю ґрунтової мікробіоти. Просторова мобільність фосфатів є низькою, тому зона їх споживання обмежується безпосередньою ризосферою. Це обумовлює необхідність локалізованого внесення добрив та застосування форм, здатних підтримувати достатню концентрацію рухомих сполук у ґрунтовому розчині (Bykin, A. V., & Panchuk, T. V., 2020; Danyliuk, V. B., Vyslobodska, M. M., Vereshchak, M. R., 2003).

Для картоплі (*Solanum tuberosum* L.) фосфор є критично важливим у період початкового росту та під час переходу до бульбоутворення. На ранніх етапах він забезпечує інтенсивне формування листової поверхні та розвиток кореневої системи, що визначає потенціал фотосинтетичної продуктивності агроценозу. У фазі ініціації бульб адекватне фосфорне живлення сприяє диференціації столонів та накопиченню асимілянтів у коренях (Parkhuts, I. M., 2014; Kryzaska, M. A., Potapenko, L. V., 2014). Оптимізація цього елементу у живленні впливає не лише на загальну врожайність, а й на фракційний склад бульб, що має принципове значення для насінницького напрямку (Setu H., 2022).

Дані літератури щодо перерозподілу фосфору в онтогенезі картоплі є неоднозначними. Одні дослідники фіксують максимальну концентрацію елемента у листовому апараті в першій половині вегетації з подальшим його переміщенням у бульби. Інші вказують на поступове зниження вмісту фосфору у вегетативних органах паралельно з інтенсивним накопиченням у підземних запасючих структурах. Така варіабельність результатів може бути зумовлена сортовими особливостями, рівнем мінерального живлення та погодними чинниками (Hrytsaienko, Z. M., Ponomarenko, S. P., Karpenko V. P., 2008).

Аналіз наукових даних дозволяє припустити, що продуктивність картоплі формується внаслідок інтеграції мінерального та гормонального регулювання. Фосфор забезпечує енергетичну основу для синтетичних процесів, тоді як гібереліни визначають напрям використання асимілянтів — на вегетативний ріст або формування бульб. Гібереліни також впливають на інтенсивність фотосинтетичних процесів, опосередковано підвищуючи синтез хлорофілу та активність ферментів вуглецевого обміну. Це створює передумови для більш ефективного накопичення пластичних речовин і їх транспорту до підземних органів (Kuryata V. G., Golunova L. A., 2018). Важливим елементом регуляції продукційного процесу картоплі є застосування фітогормонів, зокрема гіберелінів. Ці дитерпеноїдні сполуки виконують функцію сигнальних молекул, що контролюють клітинний поділ, подовження та морфогенез. Їх дія у рослин картоплі має специфічні особливості, пов'язані з формуванням бульб. Підвищена концентрація гіберелінів стимулює видовження столонів і пригнічує їх потовщення, тоді як зниження гормонального рівня або зміна співвідношення з абсцизовою кислотою і цитокінінами сприяє ініціації бульбоутворення (Hrytsaienko, Z. M., 2008; Kalinin, F. A., 1989; Musatenko, L. I., 2009). Отже, морфогенетичний ефект визначається не абсолютною кількістю гормону, а його взаємодією з іншими регуляторними системами.

Водночас у картоплі гібереліни відіграють важливу роль у регуляції процесів

бульбоутворення. Відомо, що підвищений рівень ендогенних гіберелінів може інгібувати ініціацію бульб, оскільки вони стимулюють подовження столонів замість їх потовщення. Натомість зниження концентрації гіберелінів або зміна співвідношення з іншими фітогормонами сприяє переходу столонів до формування бульб. Таким чином, гормональний баланс визначає інтенсивність та строки бульбоутворення (Kalinin, F. A., 1989; Musatenko, L. I., 2009). За оптимальних умов це може сприяти підвищенню врожайності та покращенню фракційного складу бульб.

Отже, у рослин картоплі гібереліни виконують функцію складного регуляторного чинника, що визначає спрямованість ростових процесів і формування врожаю. Їх застосування в технологіях вирощування потребує науково обґрунтованого підходу з урахуванням фаз розвитку культури та фізіологічного стану рослин (Davies P. J., 2004; Khan A. L. et al., 2015). Таким чином, гібереліни виступають універсальним регулятором росту і розвитку, інтегруючи гормональні сигнали та забезпечуючи координацію фізіологічних процесів у рослинному організмі (Gantait S., Sinniah U. R., 2012).

Матеріали і методи

Дослідження виконано упродовж 2024–2025 років в насінницькій сівозміні Інституту картоплярства НААН (с-ще Немішаєве, Київська область), розташованого у зоні Південного Полісся України. Схема садіння картоплі 75 × 20 см, за густоти стояння рослин – 55,0 тис. шт./га. Ділянки – чотирирядкові, повторність триразова. Облікова площа становила 22,5 м².

Насіннєвий матеріал залишався незмінним протягом двох років з метою забезпечення об'єктивної оцінки впливу регулятора росту рослин, рідкого фосфорного добрива (РФД) та краплинного зрошення на формування стеблостою та урожайності базової картоплі. У досліді використовували базовий насіннєвий матеріал насіннєвої картоплі класу супер-супереліта середньостиглих сортів Мирослава та Родинна, оздоровлений біотехнічним методом. Основне удобрення здійснювали шляхом локального внесення водного розчину нітроамофоски NPK 16:16:16 у нормі 300 кг/га в борозну перед висаджуванням бульб. Технологія вирощування базової картоплі відповідала загальноприйнятим насінницьким вимогам у зоні Полісся України. Агротехніка включала весняну оранку, культивуацію та формування гребенів за фрезерним культиватором.

Система захисту рослин включала протруювання посадкового матеріалу препаратом Селест Топ у нормі 0,4 л/т. У період вегетації проти комплексу шкідників застосовували інсектицид Кораген у нормі 0,05 – 0,1 л/га, а проти хвороб — фунгіцид Курзат у нормі 2,0 – 2,5 кг/га. Дію регулятора росту рослин та добрива та РФД

Комбіфос вивчали на фоні зазначеної системи удобрення та захисту рослин. Передсадивна обробка бульб здійснювала гібереловою кислотою у нормі 50 мг/т та двох разовий обробіток по вегетації РКД Комбіфос у нормі 5 л/га.

Гіберелова кислота (Gibberellic acid, GA_3) — представник класу гіберелінів, що належить до тетрациклічних дитерпеноїдних фітогормонів. За хімічною природою це низькомолекулярна органічна сполука з формулою $C_{19}H_{22}O_6$. Фізіологічна дія гіберелової кислоти проявляється насамперед у стимулюванні ростових процесів. Застосування GA_3 у технологіях вирощування культур сприяє підвищенню енергії проростання, вирівняності сходів та формуванню потужнішого листкового апарату, що безпосередньо впливає на фотосинтетичну продуктивність посівів.

Комбіфос — це концентроване рідке комплексне добриво з підвищеним вмістом фосфору (P_2O_5 – 29,8) та калію (K_2O – 5,1 %), додатково збагачене магнієм (MgO – 4,5 %), марганцем (MnO – 0,7 %) і цинком (Zn – 0,3 %). Препарат призначений для забезпечення рослин доступними елементами живлення у критичні фази росту й розвитку. Комбіфос є доцільним для культур із високими потребами у фосфорі та калії, зокрема картоплі, кукурудзи та зернових. Його використання у системах позакореневого підживлення сприяє оперативному коригуванню мінерального живлення та підвищенню коефіцієнта використання поживних речовин.

Схема дослідю

1. Контроль ($N_{12}P_{11}K_{18}$ вигляді водного розчину) + обробка бульб Селест Топ, 0,4 л/т – без обробок рослин по вегетації (ФОН);

2. ФОН + РФД Комбіфос у нормі 5 л/га, дворазове позакореневе підживлення у період вегетації;

3. ФОН + передсадивна обробка бульб гібереловою кислотою GA_3 у нормі 50 мг/т,

4. ФОН + краплинне зрошення;

5. ФОН + комплексна дія агрозаходів: Комбіфос у нормі 5 л/га + гіберелова кислота GA_3 у нормі 50 мг/т + краплинне зрошення (вар. 2+3+4).

Облік урожаю проводили поділянковий з кожного варіанту й повторення. Структуру врожаю визначали за результатами першого та третього повторення. Проби відбирали до 20 кг та відбирали з кожного варіанта та розподіляли бульби на фракції: до 28 мм, 28 – 55 мм та понад 55 мм за найбільшим поперечним діаметром бульби. Для кожної фракції визначали кількість бульб, їх масу та частку в загальній урожайності (Бондарчук А.А., Колтунов В.А., 2019).

Результати та обговорення

У 2024 – 2025 рр. досліджували вплив регулятора росту рослин, рідкого фосфорного добрива та краплинного зрошення на формування стеблостою картоплі. У контрольному варіанті

густота стеблостою становила 227,6 тис. шт./га у сорту Мирослава та 244,8 тис. шт./га у сорту Родинна відповідно (табл. 1). Позакореневе підживлення РФД Комбіфос у нормі 5 л/га сприяло незначному збільшенню кількості стебел: у сорту Мирослава – до 232,5 тис. шт./га (приріст 2,1 %), у Родинна – 255,2 тис. шт./га (4,2 % до контролю). Передсадивна обробка бульб гібереловою кислотою у нормі 50 мг/т забезпечила суттєвий приріст відповідно контролю, що склав 239,5 тис. шт./га або 5,0 % у сорту Мирослава та 264,1 тис. шт./га або 7,9 % у сорту Родинна.

Застосування краплинного зрошення підвищило щільність стеблостою насаджень – на 13,1 % у сорту Мирослава та на 13,7% за сортом Родинна. Максимальні показники зафіксовано за комплексного застосування досліджуваних агрозаходів. За сортом Мирослава густота стеблостою становила 265,2 тис. шт./га, за приростом 37,6 тис. шт./га або 16,5 %, а за сортом Родинна отримано більший приріст 52,4 тис. шт./га або 21,4 % за виходу 297,2 тис. шт./га.

У 2025 році стеблеутворююча здатність сорту Мирослава в контрольному варіанті становила 233,1 тис. шт./га. Застосування РФД Комбіфос підвищило щільність стеблостою насаджень до 242,0 тис. шт./га з приростом до 3,8 %, а максимальний ефект отримано за поєднаного застосування всіх агротехнологічних заходів густота стебел становить 266,5 тис. шт./га (приріст 14,3 % відносно контролю). У сорті Родинна контрольний варіант характеризувався показником густоти стебел 234,4 тис. шт./га. Краплинне зрошення сприяло зростанню густоти стеблостою до 277,8 тис. шт./га, що забезпечило приріст до контролю 18,5 %, а спільна дія всіх агротехнологічних факторів – до 294,8 тис. шт./га з приростом 25,8 %. У всіх варіантах дослідю спостерігалася позитивна динаміка збільшення густоти стеблостою рослин картоплі порівняно з контрольним варіантом, що свідчить про стимулюючий вплив досліджуваних агротехнологічних факторів на ріст картоплі.

Застосування досліджуваних чинників – регулятора росту рослин, позакореневого підживлення та краплинного зрошення істотно вплинуло на продуктивність сортів картоплі Мирослава та Родинна у 2024 – 2025 рр. У варіанті без застосування РРР та зрошення урожайність сорту Мирослава становила 34,7 т/га, що на 2,4 т/га вище порівняно з сортом Родинна 32,3 т/га (табл. 2). Подібна тенденція зберігалася в усіх варіантах дослідю, що свідчить про вищий потенціал урожайності сорту Мирослава в умовах проведення дослідження. Обробка насаджень картоплі РФД Комбіфос у нормі 5 л/га забезпечило приріст урожайності на 4,2 т/га або 12,1 % для сорту Мирослава та на 2,0 т/га або 6,2% для сорту Родинна відповідно до контролю, що підтверджує позитивний вплив рідкого фосфорного добрива на зростання продуктивності бульб картоплі.

Таблиця 1. Вплив регулятора росту, позакореневого підживлення та краплинного зрошення на стеблоутворюючу здатність базової картоплі, тис. шт/га

№ п/п	Варіанти	2024 р.	2025 р.	Середнє	± до контролю	
с. Мирослава						
1.	Без обробки (контроль)	222,2	233,1	227,6		%
2.	Комбіфос 5л/га по вегетації	223,0	242,0	232,5	4,9	2,1
3.	Гіберелова кислота Г _{A3} ,50мг/т, обробка бульб	245,2	233,1	239,1	11,5	5,0
4.	Краплинне зрошення	254,4	260,8	257,5	29,9	13,1
5.	Спільна дія, варіанти 2+3+4	264,0	266,5	265,2	37,6	16,5
с. Родинна						
1.	Без обробки (контроль)	255,3	234,4	244,8		
2.	Комбіфос 5л/га по вегетації	255,3	255,1	255,2	10,4	4,2
3.	Гіберелова кислота Г _{A3} ,50мг/т, обробка бульб	288,3	239,9	264,1	19,3	7,9
4.	Краплинне зрошення	279,0	277,8	278,4	33,6	13,7
5.	Спільна дія, варіанти 2+3+4	299,7	294,8	297,2	52,4	21,4

Передсадивна обробка бульб картоплі гібереловою кислотою у нормі 50 мг/т забезпечила формування урожайності на рівні 40,2 т/га за сортом Мирослава та 34,8 т/га за сортом Родинна, що перевищує показники контролю відповідно на 15,8 % та 12,0 %. Одним із найефективніших чинників впливу на продуктивність картоплі виявилось краплинне зрошення. За його застосування урожайність зросла до 42,9 т/га з приростом 8,2 т/га за сортом Мирослава та 37,6 т/га з приростом 5,3 т/га за сортом Родинна, що відповідає приросту на 23,6 % та 16,4 % відносно контролю.

Найвищі показники продуктивності зафіксовано за комплексного застосування досліджуваних агрозаходів. Поєднання підживлення рідким фосфорним добривом, регулятора росту та краплинного зрошення урожайність сягнула максимальних значень у сорту картоплі Мирослава та склала 44,5 т/га з приростом 9,8 т/га або 28,2 % та за сортом Родинна –

41,6 т/га за приростом відповідно до контролю 9,3 т/га або 28,8%. Слід зазначити, що для сорту Родинна відносний приріст від комплексної дії чинників був навіть вищим, ніж у сорту Мирослава.

Аналіз структури врожаю за розміром бульб показує, що комплексне застосування агрозаходів сприяло зростанню частки насінневої фракції картоплі (28-55 мм за найбільшим поперечним діаметром) бульб та великої фракції (>55 мм). Зокрема, у сорту Мирослава вихід великої фракції збільшився на контролі з 11,4 т/га до 12,2 т/га, а у сорту Родинна – з 8,2 т/га до 11,1 т/га. Статистична обробка даних підтвердила їх достовірність, оскільки різниця між варіантами перевищує показник найменшої істотної різниці (HP_{05}), який для загальної урожайності склав 4,2 т/га за сортом Мирослава та 4,0 т/га за сортом Родинна.

Таблиця 2. Урожайність бульб картоплі залежно від застосування регулятора росту рослин, позакореневого підживлення та краплинного зрошення, т/га 2024 – 2025 рр.

сорт Мирослава								сорт Родинна					
№ п/п	Варіант	Урожайність, т/га				± до контролю		Урожайність, т/га				± до контролю	
		<28	28-55	>55	Разом	т/га	%	<28	28-55	>55	Разом	т/га	%
1.	Без обробки (контроль)	2,7	20,6	11,4	34,7	-	-	2,4	21,7	8,2	32,3	-	-
2.	Комбіфос 5л/га по вегетації	2,3	23,0	13,6	38,9	4,2	12,1	3,8	22,8	7,7	34,3	2,0	6,2
3.	Гіберелова кислота Г _{A3} 50мг/т	1,7	23,8	14,7	40,2	5,5	15,8	2,9	21,3	10,6	34,8	2,5	7,7
4.	Краплинне зрошення	2,4	25,9	14,6	42,9	8,2	23,6	2,5	24,2	10,9	37,6	5,3	16,4
5.	Спільна дія варіанти 2+3+4	2,5	29,8	12,2	44,5	9,8	28,2	2,1	28,4	11,1	41,6	9,3	28,8
HP ₀₅		0,4	3,8	2,1	4,2	4,2	-	0,5	3,2	1,9	4,0	4,0	25

Висновки



Встановлено, що застосування регулятора росту рослин гіберелової кислоти, позакореневого підживлення РКД Комбіфос та краплинного зрошення істотно впливають на формування густоти стеблостою насаджень та урожайність базової насінневої картоплі в умовах Південного Полісся України. Позакореневе підживлення РКД Комбіфос у нормі 5 л/га забезпечувало помірне підвищення густоти стеблостою, тоді як передсадивна обробка бульб гібереловою кислотою у нормі 50 мг/т на 1 тону сприяла більш вираженій стимуляції стеблеутворення. Найбільш істотний вплив на формування стеблостою мало краплинне зрошення, яке підвищувало густоту стебел у середньому на 13,0 – 14,0 % відносно варіанту без зрошення.

Список використаної літератури

Bondarchuk, A. A., et al. (2019). Kartopliarstvo: metodyka doslidnoi spravy (Potato growing: methodology of experimental research). Vinnytsia: Nilan-LTD. [in Ukrainian].

Bykin, A. V., & Panchuk, T. V. (2020). Productivity of seed potatoes under localized application of phosphorus and potassium fertilizers. *Roslynnytstvo ta gruntoznavstvo*, 12(2), 37–46. <https://doi.org/10.31548/agr2020.02.037>

Danyliuk, V. B., Vyslobodska, M. M., & Vereshchak, M. R. (2003). Efficiency of using different forms of phosphorus fertilizers in potato cultivation. *Peredhirne ta hirske zemlerobstvo i tvarynnytstvo*, 19. [in Ukrainian].

Davies, P. J. (2004). Plant hormones: biosynthesis, signal transduction, action. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2686-7>

Gantait, S., Sinniah, U. R., Ali, M. N., & Sahu, N. C. (2015). Gibberellins – a multifaceted hormone in plant growth regulatory network. *Current Protein and Peptide Science*, 16(5), 406–412. <https://doi.org/10.2174/1389203716666150330125439>

Hrytsaienko, Z. M., Ponomarenko, S. P., Karpenko, V. P., & Leontiuk, I. B. (2008). Biologically active substances in crop production. Kyiv: Nichlava. [in Ukrainian].

Kalinin, F. A. (1989). Application of plant growth regulators in agriculture. Kyiv: Urozhai. [in Ukrainian].

Kanivets, V. I., Tokmakova, L. M., Pyshchur, I. M., & Blyzniuk, N. M. (1997). Phosphorus in soil and ways of its availability to plants. *Biuletyn Instytutu silskohospodarskoi mikrobiologii*, 1, 27–28. [in Ukrainian].

Khan, A. L., et al. (2012). Endophytic fungal association via gibberellins and indole acetic acid can improve plant growth under abiotic stress: an example of *Paecilomyces formosus* LHL10. *BMC Microbiology*, 12(1), 3. <https://doi.org/10.1186/1471-2180-12-3>

Максимальні показники стеблеутворюючої здатності та урожайності отримано за комплексного застосування регулятора росту рослин, позакореневого підживлення та краплинного зрошення, що забезпечило приріст густоти стеблостою насаджень на 16,5 – 21,4 %, що сприяло суттєвому підвищенню врожайності на 28,2 – 28,8 %. Комплексне поєднання досліджуваних агротехнічних заходів є ефективним елементом удосконалення технології вирощування базової насінневої картоплі та доцільним для впровадження в умовах Південного Полісся України на підприємствах з виробництва насінневої картоплі.

Khrystenko, S. I., & Makliuk, O. I. (2004). Phosphorus in soil and microbiological processes of its transformation. In: Fosfor i kalii u zemlerobstvi. Problemy mikrobiologichnoi mobilizatsii: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference. Chernihiv–Kharkiv, 160–166. [in Ukrainian].

Kryzyska, M. A., & Potapenko, L. V. (2014). Agrochemical, agroecological and economic assessment of different fertilization systems in potato cultivation. *Naukovi pratsi Instytutu bioenerhetychnykh kultur i tsukrovnykh buriakiv*, 21, 33–39. [in Ukrainian].

Kuryata, V. G., & Golunova, L. A. (2018). Peculiarities of the formation and functioning of soybean-rhizobial complexes and the productivity of soybean culture under the influence of retardant paclobutrazol. *Ukrainian Journal of Ecology*, 8(3), 98–105. https://doi.org/10.15421/2018_215

Musatenko, L. I. (2009). Phytohormones and physiologically active substances in regulation of plant growth and development. In: Fiziologhiia roslin: problemy ta perspektyvy rozvytku. Kyiv: Logos, 508–536. [in Ukrainian].

Parkhuts, I. M. (2014). Productivity of potatoes depending on fertilization on dark gray podzolized soils of the Western Forest-Steppe. In: Aktualni problemy gruntoznavstva, zemlerobstva ta ahrokhimii: Proceedings of the International Scientific and Practical Internet Conference. Lviv, 270–276. [in Ukrainian].

Setu, H. (2022). Effect of phosphorus and potassium fertilizers application on soil chemical characteristics and their accumulation in potato plant tissues. *Applied and Environmental Soil Science*, 1, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2022/5342170>

Shevchenko, I. M. (2013). Changes in the content of available phosphorus in soil under different fertilization and tillage systems. *Visnyk Poltavskoi derzhavnoi ahrarnoi akademii*, 4, 149–152. [in Ukrainian].



AND STEM DENSITY OF BASIC SEED POTATOES IN THE CONDITIONS OF THE SOUTHERN POLISSIA

Olha PIKICH, ORCID: 0000-0003-1853-9904

Olha VYSHNEVSKA, ORCID: 0000-0002-1089-6862

Institute of Potato Research of the NAAS of Ukraine

One of the promising directions in the technology of high-category seed potato production is the use of plant growth regulators, liquid phosphorus fertilizers, and foliar fertilization in combination with modern irrigation systems. In particular, gibberellic acid activates physiological and biochemical processes in plants, stimulates tuber sprouting, enhances the growth of above-ground biomass and the root system, and affects tuber formation. The aim of the research was to determine the effectiveness of applying a plant growth regulator, foliar phosphorus fertilization, and drip irrigation in increasing the seed productivity of basic seed potatoes under the conditions of the Southern Polissia of Ukraine. It was found that pre-planting treatment of tubers with gibberellic acid (50 mg/t) in combination with foliar fertilization using the liquid phosphorus fertilizer Combiphos (5 l/ha) and drip irrigation provided a significant increase in yield and stem density. Under the combined effect of these agronomic practices, the yield of seed-size tubers reached 44.5 t/ha in the Myroslava variety and 41.6 t/ha in the Rodynna variety, which was 9.7 and 9.3 t/ha higher than the control, respectively.

Keywords: potato, seed production, yield, seed productivity, plant growth regulator, foliar feeding, drip irrigation.

This is an open-access article under the terms of the Creative Commons

Отримано: 9.3.2026

Погоджено до друку: 11.6.2026

Опубліковано: 30.9.2026

НОВИНИ АГРАРНОГО КОМПЛЕКСУ

Площа органічних земель в Україні за рік зросла майже на 20%

У 2025 році площа сільськогосподарських земель, зайнятих під органічне виробництво в Україні, зросла до 418,5 тис. га. Це майже на 69,2 тис. га, або 19,8%, більше, ніж роком раніше, передає «ПроАгро Груп».

За даними Міністерства аграрної політики та продовольства України, станом на 31 грудня 2025 року органічне сільське господарство в Україні охоплювало 418 532 га сільськогосподарських земель. Із них:

411 497 га мали органічний статус;

7 035 га перебували у перехідному періоді.

Для порівняння, у 2024 році загальна площа земель під органічним виробництвом та земель у перехідному періоді становила 349 348 га. Тобто, за рік площа збільшилася на 69 184 га, або майже на 20%.

Кількість органічних операторів також зросла. У 2025 році в Україні налічувалося 473 оператори органічного ринку, з яких 430 були сільськогосподарськими виробниками.

У 2024 році кількість операторів становила 436. Отже, за рік їх стало на 37 більше, або приблизно на 8,5%.

У Мінагрополітики зазначили, що інформацію про кількість операторів та площі земель, зайнятих під органічним виробництвом, щороку збирають на основі даних іноземних органів сертифікації, які сертифікують органічне виробництво та обіг органічної продукції в Україні.

Як і раніше, Україна продовжує утримувати позиції в топ-5 провідних постачальників органічної продукції у світі навіть попри складні умови війни та проблеми з логістикою.

За матеріалами: supragronom.com

© О.-Я. Я. Процайло, О. Й. Качмар, 2026
УДК 633.15:631.452:631.895:631.582

DOI: 10.32636/agroscience.2026-(5)-3-4

ВПЛИВ СИСТЕМ УДОБРЕННЯ ТА ПОПЕРЕДНИКІВ НА РОДЮЧІСТЬ СІРОГО ЛІСОВОГО ҐРУНТУ ТА УРОЖАЙНІСТЬ КУКУРУДЗИ НА ЗЕРНО У КОРОТКОРОТАЦІЙНИХ СІВОЗМІНАХ

Олександр-Ярослав ПРОЦАЙЛО, аспірант, ORCID: 0009-0009-2815-1314
Оксана КАЧМАР, кандидат сільськогосподарських наук, ORCID: 0000-0002-0382-6030

Інститут сільського господарства Карпатського регіону НААН
вул. Грушевського, 5, с. Оброшине, Львівський р-н, Львівська обл., 81115, Україна
oksanaostrowska@ukr.net

У статті наведено результати досліджень формування ефективної родючості сірого лісового ґрунту за вирощування кукурудзи на зерно в п'ятипільних польових сівозмінах під впливом систем удобрення та попередників. Встановлено, що вищі значення рухомих форм основних елементів живлення рослин протягом вегетації культури на неудобрених фонах були після попередників соя (у фазі сходів в орному шарі концентраційний рівень сполук легко гідролізного азоту становив 115,2-117,0 мг/кг, доступного фосфору – 119,1-119,7, калію – 104,4-105,4 мг/кг ґрунту) та пшениця озима (відповідно за досліджуваними нутрієнтами: 113,1-113,6, 116,1-116,8 і 102,9-103,6 мг/кг ґрунту), нижчі – після картоплі та кукурудзи. Застосування органо-мінеральних систем удобрення забезпечувало зростання показників родючості ґрунту. Вищі значення легкогідролізного азоту, рухомих форм фосфору й калію впродовж вегетації кукурудзи на зерно формувались на варіантах раціональної та інтенсивної систем удобрення за сумісного внесення безпосередньо під культуру N₁₂₀-150P₁₀₀-120K₁₀₀-120 на фоні побічної продукції попередника пшениці озимої та заорювання післяжнивної редьки олійної і сприяло отриманню 7,62-9,93 т/га зерна культури.

Ключові слова: кукурудза, попередники, удобрення, родючість ґрунту, поживний режим, сівозміна.

Стаття з відкритим доступом на умовах ліцензії Creative Commons

Вступ

Високий рівень ефективної родючості ґрунтів, їх екологічна стійкість, функціональна біопродуктивна стабільність є визначальною умовою результативності та конкурентоспроможності аграрного виробництва, отримання вагомих урожаїв сільськогосподарських культур (Baliuk, S. A., Nosko, B. S. & Vorotyntseva, L. I., 2018; Gamayunova V., Khonenko L., Baklanova T., Kovalenko O., Pilipenko T., 2020; Nosko, B. S., Medvediev, V. V. & Nepochatov, O. P., 2000; Majumdar K., Norton R., Murrell T. S., Garcia F., Zingore S., Prochnow L. I., Pampolino M., Boulal H., Dutta S., Francisco E., Tan M. S., He P., Singh K., Oberthür T., 2021).

Для максимальної реалізації потенціалу продуктивності кукурудзи на зерно необхідним є оптимізація середовища її життєіснування, повна забезпеченість рослин елементами живлення за найбільш фізіологічно комфортного водно-фізичного, теплового, гербологічного стану ґрунту. У цьому аспекті важливими агротехнологічними чинниками управління процесами ґрунтового докращення і біолого-репродуктивними функціями життєдіяльності рослин є удобрення. Його потрібно розглядати комплексно, як багатоеlementну складову сівозмінно-технологічних систем, де раціонально поєднуються мінеральні й органічні компоненти, внесені безпосередньо під культуру, або під різновіддалені у сівозміні попередники. Тобто з урахуванням прямого впливу на культуру, або у післядії (Pacheco, C.A., Oliveira, A., Tomaz, A., 2023; Dawson C. J., Hilton J., 2011; Hospodarenko H.,

Liubych V., Stotskyi V., 2022; Karabach, K., Tarasyuk, V., Trach, I., Vitrovchak, L., & Bezikonnyi, P., 2025; Smetanska I. M., 2000).

Численними науковими дослідженнями доведено ефективність органо-мінеральних систем удобрення як за впливом на рослину, так і на відновні реабілітаційно-регенераційні ґрунтові режими (O. Y. Kachmar, A. O. Dubyska, M. M. Shcherba, I. V. Saveryn, O. V. Taravska, A. I. Vovk, Z. O. Kotyk, 2022; Hospodarenko, H. M., Prokopchuk, I. V., Stasinievych, O. Yu. & Boiko V. P., 2019; Hrynko, Yu. & Kharytonova, D., 2019; Panayotova G., Kostadinova S., Aleksieva S., Slavova N., Aladzhova C., 2018; Arbačauskas J., Masevičienė A., Staugaitis G., Žičkienė L., Šumskis D., Vaišvila Z., 2021). За таких умов забезпечується посилення рециркуляції елементів живлення та їх кругообіг у цілому, формуються оптимальні умови збереження і відновлення родючості ґрунтів – базової вимоги ведення землеробства.

Відсутність достатньої кількості традиційного органічного добрива – гною великої рогатої худоби вимагає наукового пошуку альтернативного джерела поповнення ґрунту органічними речовинами. Експериментальними дослідженнями підтверджено результативність залишення максимально можливої кількості побічної продукції вирощуваних рослин (соломи зернових культур, стебел кукурудзи на зерно), включення у сівозміну сидеральних культур в основному, післяукісному чи післяжнивному вирощуванні для забезпечення ґрунтового

середовища достатньою кількістю органічного субстрату (Tsytysura, Y. G.; 2025; Y. Tsytysura, 2026; Shao J., Gao C., Afi Seglah P., Xie J., Zhao L., Bi Y., Wang Y., 2023).

Згідно досліджень, проведених О. А. Літвіною, використання побічної продукції усіх сільськогосподарських культур сівозмін у поєднанні з помірними дозами мінеральних і органічних добрив сприяє збалансуванню елементів живлення у сірому лісовому ґрунті, покращенню забезпеченості рослин доступними сполуками калію на рівні подвійної дози гною або мінеральних добрив (Litvinova O.A., 2023).

За інтенсивного агровиробництва сидеральні культури рекомендовано вирощувати у післяжнивних посівах зернових культур на фонах подрібненої соломи (О. Y. Kachmar, A. O. Dubytska, M. M. Shcherba, I. V. Saveryn, O. V. Taravska, A. I. Vovk, Z. O. Kotyck, 2022). Особливо ефективним таке компонування є в ґрунтово-кліматичних умовах Західного регіону України. Достатні вологозапаси

ґрунтів та підвищений температурний режим останніх десятиліть сприяють не тільки активізації процесів мінералізації свіжої органічної речовини, але й накопиченню вологи в зеленій масі сидерату та пролонговане її вивільненні протягом наступних періодів. На мінеральних фонах такі агротехнологічні прийоми забезпечують також нагромадження й перерозподіл поживних речовин протягом усієї вегетації рослин, формують збалансоване за елементами живлення агрохімічне ґрунтове середовище.

Матеріали і методи

Дослідження проводили протягом 2024-2025 рр. в умовах багаторічного експериментального стаціонарного полігону Інституту сільського господарства Карпатського регіону.

У таблиці 1 подано скорочену схему дослідів. Нумерацію сівозмін збережено у відповідності до повної структури експерименту.

Таблиця 1. Схема дослідів

Таблиця 1. Схема досліду				
№	Сівозміни	Система удобрення		
		Контроль (без добрив)	Раціональна	Інтенсивна
1. Плодозмінна сівозміна				
1	Багаторічні трави (конюшина лучна)	-	P ₃₀ K ₃₀	P ₄₅ K ₄₅
2	Пшениця озима	-	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀	N ₁₅₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀
3	Картопля	-	N ₉₀ P ₆₀ K ₁₂₀ + п. п. + сидерат	N ₁₂₀ P ₉₀ K ₁₅₀ + п. п. + сидерат
4	Кукурудза на зерно	-	N ₁₂₀ P ₁₀₀ K ₁₀₀	N ₁₅₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀
5	Ячмінь з підсівом конюшини	-	N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀ + п. п.	N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀ + п. п.
3. Зерно-трав'яна сівозміна				
1	Однорічні трави (вико-овес)	-	N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀ + п. п.	N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀ + п. п.
2	Жито озиме	-	N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀
3	Ріпак озимий	-	N ₁₂₀ P ₇₀ K ₁₄₀ + п. п.	N ₁₅₀ P ₉₀ K ₁₈₀ + п. п.
4	Соя	-	N ₄₅ P ₄₅ K ₄₅ + п. п. + сидерат	N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀ + п. п. + сидерат
5	Кукурудза на зерно	-	N ₁₂₀ P ₁₀₀ K ₁₀₀ + п. п.	N ₁₅₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀ + п. п.
4. Зернова сівозміна				
1	Горох	-	N ₄₅ P ₄₅ K ₄₅ + п. п.	N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀ + п. п.
2	Пшениця озима	-	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀ + п. п.	N ₁₅₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀ + п. п.
3	Овес	-	N ₄₀ P ₄₀ K ₄₀ + п. п. + сидерат	N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀ + п. п. + сидерат
4	Соя	-	N ₄₅ P ₄₅ K ₄₅ + п. п.	N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀ + п. п.
5	Кукурудза на зерно	-	N ₁₂₀ P ₁₀₀ K ₁₀₀ + п. п.	N ₁₅₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀ + п. п.
5. Зернова сівозміна				
1	Соя	-	N ₄₅ P ₄₅ K ₄₅ + п. п.	N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀ + п. п.
2	Пшениця озима	-	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀ + п. п.	N ₁₅₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀ + п. п.
3	Кукурудза на зерно	-	N ₁₂₀ P ₁₀₀ K ₁₀₀ + п. п. + сидерат	N ₁₅₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀ + п. п. + сидерат
4	Овес	-	N ₄₀ P ₄₀ K ₄₀ + п. п.	N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀ + п. п.
5	Жито озиме	-	N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀ + п. п.	N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀ + п. п.
7. Зернова сівозміна				
1	Боби кормові	-	N ₄₅ P ₄₅ K ₄₅ + п. п.	N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀ + п. п.
2	Пшениця озима	-	N ₉₀ P ₆₀ K ₆₀ + п. п.	N ₁₅₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀ + п. п.
3	Кукурудза на зерно	-	N ₁₂₀ P ₁₀₀ K ₁₀₀ + п. п. + сидерат	N ₁₅₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀ + п. п. + сидерат
4	Кукурудза на зерно	-	N ₁₂₀ P ₁₀₀ K ₁₀₀ + п. п.	N ₁₅₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀ + п. п.
5	Овес	-	N ₄₀ P ₄₀ K ₄₀ + п. п.	N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀ + п. п.

Примітка: п.п. – побічна продукція

Дослід закладено в 2001 році на сірому лісовому поверхнево оглеєному крупно пилюватому легкосуглинковому ґрунті, орний (0–20 см) шар якого характеризувався наступними усередненими вихідними показниками родючості: pH_{KCl} 4,70–4,84, гідролітична кислотність (за Каппеном) – 2,26 і сума вбирних основ 4,4–5,0 мг-екв/100 г ґрунту, вміст рухомих форм фосфору та калію (за Кірсановим) відповідно – 108,0–111,1 та 93–95 мг/кг ґрунту, вміст гумусу 1,67–1,71 %.

Кількість досліджуваних факторів – 2 (ділянки першого порядку – системи короткоротаційних спеціалізованих сівозмін, другого – системи удобрення). Розміщення варіантів послідовне, повторність трикратна. Освоєння сівозміни всіма полями. Посівна площа ділянок першого порядку 810 м², облікова – 676 м²; другого порядку відповідно 90 і 52 м².

У досліді закладено і вивчається вісім польових п'ятипольних сівозмін чотирьох видів (плодозмінна, зерно-просапна, дві зерно-трав'яні, чотири зернові). У статті представлено результати досліджень, отриманих у п'яти сівозмінах на варіантах застосування органо-мінеральних систем удобрення різного рівня інтенсивності.

В досліді застосовували аміачну селітру (34 % д. р.), гранульований суперфосфат

Результати та обговорення

Забезпечення високої продуктивності сільськогосподарських культур у цілому та урожайності кукурудзи зокрема вимагає вивчення особливостей розміщення її у сучасних системах сівозмін з кращими попередниками та дослідження умов формування ефективної родючості ґрунтів шляхом запровадження збалансованих систем удобрення, які б забезпечували потреби рослин в елементах живлення протягом всієї вегетації, сприяли зворотному їх надходженню в ґрунт із рослинними рештками, відновлюючи ґрунтові запаси та екологічну рівновагу в агроландшафтах (Zaryshnyak A.S., Tsvei Y.P., Ivanina V.V., 2015; Kaminsky V.F., 2018; Potapenko L.V., Gorbachenko N. I., 2021).

Дослідженнями, проведеними в умовах п'яти короткоротаційних сівозмін з різним насиченням зерновими культурами (н. з. к.) встановлено, що на вміст поживних елементів у ґрунті впродовж вегетації кукурудзи проявляли вплив попередники та системи удобрення.

При аналізі ефективності попередника щодо впливу на поживний режим ґрунту надавали перевагу контрольним варіантам, оскільки на удобрених фонах сумарна дія двох антропогенних чинників (попередника і удобрення), залежно від сили впливу кожного з них, може формувати дещо інші закономірності.

Встановлено, що вищі значення сполук легкогідролізного азоту – показника, який

(19,5 % д.р.), калійну сіль (40 % д. р). Агротехніка вирощування культури, крім досліджуваних факторів, загальноприйнята для ґрунтово-кліматичних умов зони.

Під зяблевий обробіток ґрунту заорювали солому попередника, сидерат (олійна редька), вносили фосфорно-калійні добрива, азотні – під передпосівну культивуацію.

Відбір ґрунтових проб та підготовку їх до аналізів здійснювали згідно з ДСТУ 4287:2004 та ДСТУ ISO 11464:2001 у динаміці з шарів 0–20, 20–40 см.

Аналітичні дослідження проводили в лабораторії, яка атестована на відповідність системи керування вимірюваннями вимогам ДСТУ ISO 10012:2005 (Свідчення N РЛ 009/22, від 07.02.2022 р., видане ДП «Львівстандартметрологія»). Вміст легкогідролізного азоту визначали за ДСТУ 7863:2015, рухомого фосфору та калію за ДСТУ 4405:2005.

Облік врожаю основної і побічної продукції проводили подільночно методом суцільного обмолоту кожної ділянки з наступним перерахунком на стовідсоткову чистоту та 14 % вологість.

характеризує загальну забезпеченість рослин цим елементом живлення, упродовж вегетаційного періоду на неудобрених варіантах були після попередника соя. Так, на час сходів кукурудзи в орному (0–20 см) шарі ґрунту кількість легкогідролізного азоту становила 115,2 мг/кг ґрунту у зерновій сівозміні і 117,0 мг/кг – у зерно-трав'яній. Нижчі величини (113,1–113,6 мг/кг) спостерігали після пшениці озимої у зернових сівозмінах. Після картоплі у плодозмінній сівозміні рівень легкогідролізного азоту становив 111,4 мг/кг. У зерновій сівозміні, де кукурудзу вирощували у повторних посівах, дворічними дослідженнями відзначено 110,0 мг/кг ґрунту зазначеного елемента живлення рослин. Такі ж закономірності у перерозподілі доступних рослинам сполук азоту спостерігали протягом усієї вегетації кукурудзи. Зокрема, на час викидання кукурудзою волоті у варіантах після сої накопичувалось 103,2–105,2 мг/кг, а після пшениці озимої – 101,2–102,5 мг/кг ґрунту легкогідролізного азоту. Під кукурудзою у повторних посівах відзначено лише 98,1 мг/кг цього показника. За настання повної стиглості культури загальна кількість досліджуваних форм азоту знижувалась за усіма варіантами як внаслідок споживання рослинами, так і проходження мобілізаційних процесів. На неудобрених фонах після усіх попередників їх значення були в межах 91,1–97,9 мг/кг ґрунту (табл. 2).

Таблиця 2. Вплив удобрення і попередників на динаміку легкогідролізного азоту, мг/кг ґрунту

Удобрєння кукурудзи	Шар ґрунту, см	Фаза вегетації культури		
		Сходи	Викидання волоті	Повна стиглість
1. Плодозмінна, попередник картопля (60 % н. з. к.)				
контроль	0-20	111,4	99,6	92,6
	20-40	100,5	87,5	81,5
N ₁₂₀ P ₁₀₀ K ₁₀₀	0-20	124,9	105,8	96,8
	20-40	113,2	97,4	90,4
N ₁₅₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀	0-20	132,3	112,1	101,7
	20-40	115,4	100,0	92,0
3. Зерно-трав'яна, попередник соя (80 % н. з. к.)				
контроль	0-20	117,0	105,0	97,9
	20-40	105,2	96,2	85,1
N ₁₂₀ P ₁₀₀ K ₁₀₀ + п. п.	0-20	132,7	113,6	104,6
	20-40	116,1	100,1	93,1
N ₁₅₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀ + п. п.	0-20	140,7	119,9	109,2
	20-40	118,5	102,5	94,6
4. Зернова, попередник соя (100 % н. з. к.)				
контроль	0-20	115,2	103,2	96,2
	20-40	104,6	90,6	84,5
N ₁₂₀ P ₁₀₀ K ₁₀₀ + п. п.	0-20	130,6	113,9	102,4
	20-40	115,5	100,3	91,9
N ₁₅₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀ + п. п.	0-20	138,5	120,4	107,5
	20-40	117,8	102,7	93,9
5. Зернова, попередник пшениця озима (100 % н. з. к.)				
контроль	0-20	113,6	102,5	94,7
	20-40	103,0	90,3	83,4
N ₁₂₀ P ₁₀₀ K ₁₀₀ + п. п. + сидерат	0-20	137,2	114,6	108,9
	20-40	117,7	99,9	97,7
N ₁₅₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀ + п. п. + сидерат	0-20	145,3	121,1	113,8
	20-40	119,9	102,7	96,0
7. Зернова, попередник пшениця озима (100 % н. з. к.)				
контроль	0-20	113,1	101,2	94,2
	20-40	102,2	88,7	82,6
N ₁₂₀ P ₁₀₀ K ₁₀₀ + п. п. + сидерат	0-20	135,3	113,7	107,3
	20-40	117,1	99,6	94,1
N ₁₅₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀ + п. п. + сидерат	0-20	143,9	120,6	112,6
	20-40	119,5	102,5	95,5
7. Зернова, попередник кукурудза на зерно (100 % н. з. к.)				
контроль	0-20	110,0	98,1	91,1
	20-40	98,8	86,1	80,2
N ₁₂₀ P ₁₀₀ K ₁₀₀ + п. п.	0-20	127,2	108,6	99,6
	20-40	114,0	101,8	91,3
N ₁₅₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀ + п. п.	0-20	134,0	113,4	103,8
	20-40	116,5	100,8	92,8

Примітка. н. з. к. - насичення зерновими культурами.

Таким чином, кращими попередниками для накопичення доступних сполук азоту під кукурудзою на зерно є соя та пшениця озима.

Накладання систем удобрення сприяло збільшенню величин легкогідролізного азоту. І тут важливу роль відіграло місце і склад органічної компоненти, оскільки мінеральні фони були однаковими – у раціональній системі застосовували N₁₂₀P₁₀₀K₁₀₀, в інтенсивній - N₁₅₀P₁₂₀K₁₂₀.

У плодозмінній сівозміні під кукурудзу вносили лише мінеральні добрива, органічні – під попередник – картоплю. У зерно-трав'яній та зернових після сої і кукурудзи – поєднували побічну продукцію попередника та мінеральні фони, сидерат – під попередники. У зернових після пшениці озимої – комбонували мінеральні добрива, соломі попередника та зелену масу післязимої редьки олійної.

Вищий рівень сполук легко гідролізного азоту на час сходів культури в орному шарі був на варіантах сумісного внесення $N_{120}P_{100}K_{100}$ + побічна продукція пшениці озимої + сидерат у раціональній системі удобрення зернових сівозмін і складав 135,3-137,2 мг/кг та від застосування цієї ж органічної складової й $N_{150}P_{120}K_{120}$ – 143,9-145,3 мг/кг ґрунту в інтенсивних системах удобрення. І ці значення перевищували за системами удобрення показники, які формувались після сої. Тобто вплив удобрення був вищим за дію попередника.

Внесення безпосередньо під кукурудзу самих мінеральних добрив у плодозмінній сівозміні після картоплі формувало азотний режим з нижчими показниками доступного рослинам досліджуваного елемента живлення (124,9-132,3 мг/кг) у порівнянні до зернової сівозміни з попередником кукурудза, побічну продукцію якої заробляли на аналогічних мінеральних фонах під культуру в повторних посівах (127,2-134,0 мг/кг). Такі ж закономірності за системами удобрення спостерігали протягом усіх досліджуваних фаз вегетації. Найнижчі показники, подібно до контрольних варіантів, були у фазу повної стиглості культури (96,8-113,8 мг/кг ґрунту).

У підорних горизонтах (20-40 см) вміст легкогідролізного азоту був нижчим на усіх досліджуваних варіантах.

Отже, системи удобрення сприяють збільшенню вмісту легкогідролізного азоту у ґрунті. Їх вплив є вищим у кількісному співвідношенні за дію попередника.

В умовах експерименту проводили моніторинг за вмістом сполук рухомого фосфору залежно від попередника і систем удобрення протягом основних фаз вегетації кукурудзи.

Встановлено, що вищі значення цього показника у фазі сходів на неудобрених варіантах були після попередника соя і складали 119,1-119,7 мг/кг ґрунту, нижчі – після картоплі (114,4 мг/кг) та кукурудзи (111,2 мг/кг ґрунту). Вищий рівень накопичення рухомих сполук фосфору був за сумісного внесення $N_{120}P_{100}K_{100}$ + побічна продукція пшениці озимої + сидерат (раціональна система удобрення) – 142,1-142,9 мг/кг та в умовах збільшення мінеральної складової до $N_{150}P_{120}K_{120}$ на цих же органічних фонах – 145,7-146,4 мг/кг ґрунту. На ділянках, де зелену масу редьки олійної заробляли під попередники, а безпосередньо під кукурудзу вносили побічну продукцію на зазначених мінеральних фонах діапазон варіювання досліджуваного показника змінювався залежно від сівозміни в межах 135,4-139,4 мг/кг в раціональних системах та 138,0-142,2 мг/кг ґрунту в інтенсивних. Нижчий концентраційний рівень рухомих фосфорних сполук був на мінеральних фонах плодозмінної сівозміни. Залежно від інтенсивності мінеральних добрив він становив 134,0-136,5 мг/кг ґрунту (табл. 3).

Протягом вегетації вміст доступних рослинам форм фосфору знижувався і за настання повної стиглості культури він за усіма удобреними варіантами складав 114,0-123,8 мг/кг, неудобреними – 97,6-104,8 мг/кг ґрунту. У підорних пластах вміст сполук рухомого фосфору був нижчим у порівнянні до орних.

Дослідженнями за динамікою рухомих форм калію встановлено, що застосування органо-мінеральних систем удобрення підвищувало забезпеченість рослин кукурудзи цим елементом живлення. Вищі значення спостерігали за безпосереднього внесення під культуру мінеральних добрив, побічної продукції пшениці озимої та зеленої маси післяжнивної редьки олійної у зернових сівозмінах. У раціональних системах з рівнем мінеральної складової $N_{120}P_{100}K_{100}$ на час сходів культури в орному пласті ґрунту діапазон значень досліджуваного показника змінювався в межах 127,1-127,6 мг/кг, в інтенсивних з $N_{150}P_{120}K_{120}$ відповідно – 132,6-133,3 мг/кг ґрунту. Найбільш низькими були показники за самого мінерального удобрення після картоплі у плодозмінній сівозміні. За системами удобрення вони становили 121,9-127,5 мг/кг ґрунту (табл. 4).

За впливом попередників вирізнялись соя (на контрольних варіантах було зафіксовано 104,4-105,4 мг/кг ґрунту рухомих форм калію) та пшениця озима (102,9-103,6 мг/кг). Нижчі значення були після картоплі (102,0 мг/кг) та кукурудзи (100,6 мг/кг).

До кінця вегетації вміст рухомих форм калію знижувався за усіма удобреними та неудобреними варіантами. Найнижчі значення спостерігали у фазі повної стиглості кукурудзи.

Таким чином, вищі значення основних показників родючості ґрунту формуються за органо-мінеральних систем удобрення, де органічна складова передбачає використання усієї побічної продукції сільськогосподарських культур у сівозміні та вирощування один раз за ротацію редьки олійної на сидерат у післяжнивних посівах.

В умовах органо-мінеральних систем удобрення за високого рівня ефективної родючості сірого лісового ґрунту та оптимальних попередників отримано вагомі значення урожайності зерна кукурудзи (рис. 1).

Вищі показники урожаю зерна культури були за внесення під кукурудзу повного органо-мінерального удобрення. Застосування $N_{120}P_{100}K_{100}$ на фоні побічної продукції пшениці озимої та заорювання зеленої маси редьки олійної, вирощеної у післяжнивних посівах у зернових сівозмінах забезпечувало отримання 7,62-7,74 т/га зерна кукурудзи. Підвищення рівня мінеральних добрив до $N_{150}P_{120}K_{120}$ на зазначених мінеральних фонах сприяло формуванню рівня урожаю в межах 9,82-9,93 т/га.

Таблиця 3. Вплив удобрення і попередників на динаміку рухомого фосфору, мг/кг ґрунту

Удобрєння кукурудзи	Шар ґрунту, см	Фаза вегетації культури		
		Сходи	Викидання волоті	Повна стиглість
1. Плодозмінна, попередник картопля (60 % н. з. к.)				
контроль	0-20	114,4	104,5	99,5
	20-40	106,6	99,0	94,6
N ₁₂₀ P ₁₀₀ K ₁₀₀	0-20	134,0	120,9	114,0
	20-40	119,2	108,8	103,6
N ₁₅₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀	0-20	136,5	123,5	115,5
	20-40	128,7	117,5	110,7
3. Зерно-трав'яна, попередник соя (80 % н. з. к.)				
контроль	0-20	119,7	109,8	104,8
	20-40	110,6	102,9	98,5
N ₁₂₀ P ₁₀₀ K ₁₀₀ + п. п.	0-20	139,4	126,5	118,7
	20-40	121,8	112,3	106,4
N ₁₅₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀ + п. п.	0-20	142,2	128,6	120,6
	20-40	132,1	120,5	113,9
4. Зернова, попередник соя (100 % н. з. к.)				
контроль	0-20	119,1	109,1,0	104,0
	20-40	109,8	102,1	97,7
N ₁₂₀ P ₁₀₀ K ₁₀₀ + п. п.	0-20	138,6	125,7	117,9
	20-40	121,2	111,6	105,7
N ₁₅₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀ + п. п.	0-20	141,1	127,3	119,1
	20-40	131,2	119,8	113,0
5. Зернова, попередник пшениця озима (100 % н. з. к.)				
контроль	0-20	116,8	107,0	101,9
	20-40	108,5	100,8	96,4
N ₁₂₀ P ₁₀₀ K ₁₀₀ + п. п. + сидерат	0-20	142,9	129,9	122,3
	20-40	132,4	122,2	112,9
N ₁₅₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀ + п. п. + сидерат	0-20	146,4	131,9	123,8
	20-40	133,9	123,4	116,8
7 Зернова, попередник пшениця озима (100 % н. з. к.)				
контроль	0-20	116,1	106,2	101,1
	20-40	107,9	100,2	95,8
N ₁₂₀ P ₁₀₀ K ₁₀₀ + п. п. + сидерат	0-20	142,1	129,1	120,9
	20-40	131,7	121,3	112,2
N ₁₅₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀ + п. п. + сидерат	0-20	145,7	131,0	123,1
	20-40	133,1	122,4	115,9
7 Зернова, попередник кукурудза на зерно (100 % н. з. к.)				
контроль	0-20	111,2	102,7	97,6
	20-40	105,1	97,4	93,1
N ₁₂₀ P ₁₀₀ K ₁₀₀ + п. п.	0-20	135,4	124,2	115,7
	20-40	119,8	109,6	104,4
N ₁₅₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀ + п. п.	0-20	138,0	124,8	116,8
	20-40	129,5	118,6	111,7

На варіантах, які передбачали вирощування сидеральної культури під попередники, а під кукурудзу заробляли лише їх побічну продукцію на мінеральних фонах живлення отримано нижчі значення урожаю. Зокрема, після попередника соя у раціональній системі зернової та зерно-трав'яної сівозмін цей показник був на рівні 7,20-7,33 т/га, у інтенсивній – 9,33-9,43 т/га.

Цікавими до порівняння є результати, отримані за вирощування кукурудзи у повторних посівах зернової сівозміни та після картоплі у

плодозмінній сівозміні. Незважаючи на те, що у зерновій сівозміні під культуру вносили побічну продукцію попередника – кукурудзи на мінеральних фонах, а у плодозмінній – лише мінеральні добрива, рівень урожаю в останній був вищим, тобто вплив попередника був сильнішим за удобрення. Розхит значень досліджуваного показника за варіантами удобрення у зерновій сівозміні становив 6,53-8,62 т/га, у плодозмінній – 6,83-9,01 т/га.

Таблиця 4. Вплив удобрення і попередників на динаміку рухомого калію, мг/кг ґрунту

Удобрєння кукурудзи	Шар ґрунту, см	Фаза вегетації культури		
		Сходи	Викидання волоті	Повна стиглість
1. Плодозмінна, попередник картопля (60 % н. з. к.)				
контроль	0-20	102,0	95,8	86,8
	20-40	89,1	79,5	72,5
N ₁₂₀ P ₁₀₀ K ₁₀₀	0-20	121,9	112,3	99,3
	20-40	104,3	95,5	86,5
N ₁₅₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀	0-20	127,5	117,7	102,7
	20-40	110,1	101,3	90,3
3. Зерно-трав'яна, попередник соя (80 % н. з. к.)				
контроль	0-20	105,4	99,2	90,1
	20-40	93,0	83,4	76,3
N ₁₂₀ P ₁₀₀ K ₁₀₀ + п. п.	0-20	125,2	115,8	102,8
	20-40	108,2	98,5	89,5
N ₁₅₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀ + п. п.	0-20	131,0	121,1	106,1
	20-40	113,3	104,6	93,6
4. Зернова, попередник соя (100 % н. з. к.)				
контроль	0-20	104,4	98,2	89,2
	20-40	92,3	82,6	75,6
N ₁₂₀ P ₁₀₀ K ₁₀₀ + п. п.	0-20	124,4	115,1	102,1
	20-40	107,3	97,7	88,7
N ₁₅₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀ + п. п.	0-20	130,3	120,3	105,4
	20-40	112,7	104,0	93,1
5. Зернова, попередник пшениця озима (100 % н. з. к.)				
контроль	0-20	103,6	97,5	88,5
	20-40	92,0	81,4	74,4
N ₁₂₀ P ₁₀₀ K ₁₀₀ + п. п. + сидерат	0-20	127,6	118,3	105,3
	20-40	113,4	103,6	94,6
N ₁₅₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀ + п. п. + сидерат	0-20	133,3	123,3	108,3
	20-40	115,1	106,6	95,6
7. Зернова, попередник пшениця озима (100 % н. з. к.)				
контроль	0-20	102,9	96,3	87,3
	20-40	90,4	80,8	73,8
N ₁₂₀ P ₁₀₀ K ₁₀₀ + п. п. + сидерат	0-20	127,1	117,6	104,6
	20-40	112,5	102,5	93,5
N ₁₅₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀ + п. п. + сидерат	0-20	132,6	122,6	107,6
	20-40	114,3	105,8	94,8
7. Зернова, попередник кукурудза на зерно (100 % н. з. к.)				
контроль	0-20	100,6	94,5	85,5
	20-40	87,7	78,4	71,4
N ₁₂₀ P ₁₀₀ K ₁₀₀ + п. п.	0-20	122,8	113,7	100,7
	20-40	105,5	96,7	87,2
N ₁₅₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀ + п. п.	0-20	128,2	118,6	103,6
	20-40	111,2	102,9	91,9

Висновки

Ефективна родючість ґрунту під кукурудзою у короткоротаційних сівозмінах формується під комплексним впливом систем удобрення і попередників.

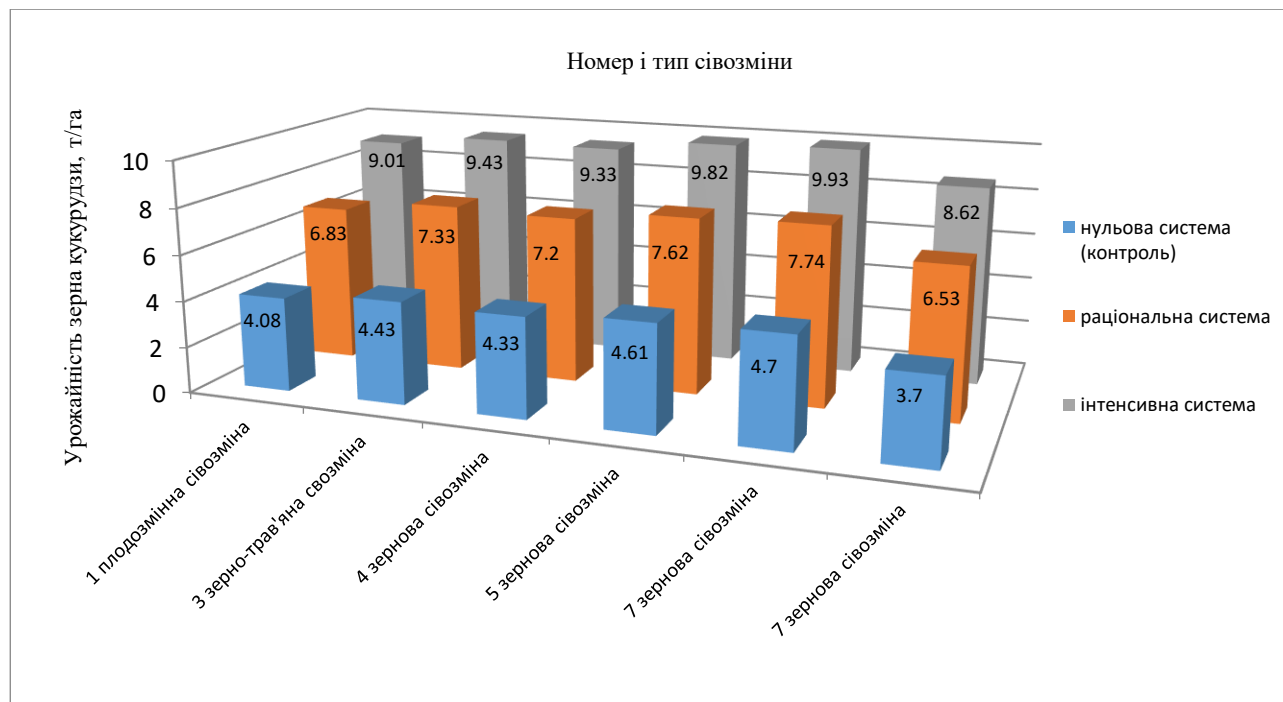
Кращими попередниками кукурудзи на зерно за дією на поживний режим сірого лісового ґрунту є соя у зерно-трав'яній та соя й пшениця озима у зернових сівозмінах. У ґрунті після повторних посівів кукурудзи на зерно відзначено найнижчі концентрації рухомих основних елементів живлення рослин.

Вищі значення легкогідролізного азоту, рухомих форм фосфору й калію впродовж вегетації кукурудзи на зерно формуються за сумісного внесення безпосередньо під культуру N₁₂₀₋₁₅₀P₁₀₀₋₁₂₀K₁₀₀₋₁₂₀ на фоні побічної продукції попередника пшениці озимої та заорювання післяжнивної редьки олійної.

Застосування N₁₂₀P₁₀₀K₁₀₀ на фоні побічної продукції пшениці озимої та заорювання зеленої маси редьки олійної, вирощеної у післяжнивних посівах у зернових сівозмінах

забезпечує отримання 7,62-7,74 т/га зерна кукурудзи. Підвищення рівня мінеральних добрив до N150P120K120 на зазначених мінеральних фонах

сприяє формуванню рівня урожаю в межах 9,82-9,93 т/га.



НР₀₅, т/га попередники 0,11-0,12
 удобрення 0,27-0,28
 взаємодія попередники + удобрення 0,34-0,35

Рисунок 1. Урожайність кукурудзи залежно від систем удобрення і попередника у сівозміні

Список використаної літератури

Arbačiauskas J., Masevičienė A., Staugaitis G., Žičkienė L., Šumskis D., Vaišvila Z. (2021). The influence of longterm fertilization on phosphorus dynamics in the soil. *Zemdirbyste-Agriculture*, 108 (3): 195–202. <https://doi.org/10.13080/z-a.2021.108.025>

Baliuk S. A., Nosko B. S. & Vorotyntseva L. I. (2018). Regulation of fertility of soils and efficiency of fertilizers in conditions of climate fluctuations. *Visnyk ahrarnoi nauky*, 4 (781), 5–12. doi: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk201804-01> [in Ukrainian].

Dawson C., Hilton J. (2011). Fertilizer availability in a resource-limited world: Production and recycling of nitrogen and phosphorus. *Food Policy*, 36 (1): 14–22. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2010.11.012>

Hospodarenko H., Liubych V., Stotskyi V. (2022). Influence of different types and doses of fertilizers on grain rotation productivity. *Bulletin of Sumy National Agrarian University. The Series: Agronomy and Biology*, 48 (2): 46–50. <https://doi.org/10.32845/agrobio.2022.2.7>

Hospodarenko H. M., Prokopchuk I. V., Stasinievykh O. Yu. & Boiko V. P. (2019). Influence of fertilizer application ratio on field crop rotation effectiveness. *Scientific Horizons*, 3 (76), 80–86. doi: 10.33249/2663-2144-2019-76-3-80-86 [in Ukrainian].

Hrynkо Yu. & Kharytonova D. (2019). Application of liquid fertilizers with sowing. *Ahronom*, 1, 24–28 [in Ukrainian].

Gamayunova V., Khonenko L., Baklanova T., Kovalenko O., Pilipenko T. (2020). Modern approaches to use of the mineral fertilizers preservation soil fertility in the conditions of climate change. *Scientific Horizons*, 2 (87): 89–101. <https://doi.org/10.33249/2663-2144-2020-87-02-89-101>

Ivanina V., Pashynska K. (2022). Formation of nutritional balance in grain sorghum crops under different fertilizer systems. *Bulletin of Sumy National Agrarian University. The Series: Agronomy and Biology*, 47 (1): 65–70. <https://doi.org/10.32845/agrobio.2022.1.9>

O. Y. Kachmar, A. O. Dubytska, M. M. Shcherba, I. V. Savryn, O. V. Taravska, A. I. Vovk, Z. O. Kotyk (2022) Redistribution of nutrient elements of gray forestal soil under grain crops in short-rotation crop rotations under different fertilization systems / *Peredhirne ta hirske zemlerobstvo i tvarynnystvo*. 72 (2): 8–24. <https://phzt-journal.isgkr.com.ua/72-2/1.pdf>

Kaminsky V.F. (2018). Scientific basis of optimization of plant nutrition in modern agricultural systems Mezhrvid. topics of science coll. "Agriculture". Vinnytsia: Tvorі LLC. Issue 2 (95). P. 3–6.

Karabach, K., Tarasyuk, V., Trach, I., Vitrovchak L., & Bezikonnyi P. (2025). Impact of

tillage and fertilisation on organic matter accumulation and soil fertility. *Scientific Horizons*, 28(8), 137-148. doi: 10.48077/scihor8.2025.137

Litvinova O.A. (2023). The influence of long-term application of fertilizers on the potassium regime of gray forest soil. Coll. of scientific works of the Institute of Agriculture of the Ukrainian Academy of Sciences. Issue 4. P. 26-30. <https://journal.udau.edu.ua/assets/files/others/-Zbirnik-UNUS-78.Ch.1.pdf>

Majumdar K., Norton R., Murrell T. S., Garcia F., Zingore S., Prochnow L. I., Pampolino M., Boulal H., Dutta S., Francisco E., Tan M. S., He P., Singh K., Oberthür T. (2021). Assessing potassium mass balances in different countries and scales. Recommendations for Agricultural Crops. Springer, p. 283-340. https://doi.org/10.1007/978-3-030-59197-7_11

Nosko B. S., Medvediev V. V. & Nepochatov O. P. (2000). The role of fertilizers in increasing the efficiency of agriculture in arid conditions. *Visnyk ahrarnoi nauky*, 5, 11-15 [in Ukrainian].

Pacheco C.A., Oliveira A., & Tomaz A. (2023). Effects of mineral and organic fertilization on forage maize yield, soil carbon balance, and NPK budgets, under rainfed conditions in the Azores Islands (Portugal). *International Journal of Plant Production*, 17, 463-475. doi: 10.1007/s42106-023-00250-7

Panayotova G., Kostadinova S., Aleksieva S., Slavova N., Aladzhova C. (2018). Nitrogen and phosphorus balances as dependent on durum wheat fertilization. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 24 (1): 9-17. <https://www.agrojournal.org/24/01s-02.pdf>

Potapenko L. V., Gorbachenko N. I. (2021). The influence of fertilization systems and microbial

preparations on the formation of the nutrient regime of sod-podzolic soil. *Agricultural microbiology*. 34, 53-60. <https://doi.org/10.35868/1997-3004.34.53-60>

Shao J., Gao C., Afi Seglah P., Xie J., Zhao L., Bi Y., Wang Y. (2023). Analysis of the available straw nutrient resources and substitution of chemical fertilizers with straw returned directly to the field in China. *Agriculture*, 13 (6): 1187. <https://doi.org/10.3390/agriculture13061187>

Smetanska I.M. (2000). The effect of mineral nutrition on the productivity of corn crops. *Visnyk ahrarnoi nauky*, 1, 72-73 [in Ukrainian]

Stasiv O., Dubytska A., Kachmar O., Dubytskyi O., & Vavrynovych O. (2025). Causal relationships between wheat productivity and biological activity and soil nitrogen content. *Scientific Horizons*, 28(8), 30-50. doi: 10.48077/scihor8.2025.30

Tsytsyura Y. G. (2025) Effectiveness of complex application of siderates with biofertilizers for growing corn for grain. *Ukrainian Journal of Natural Sciences*. No. 12. P. 257-269. ISSN 2786-6335. DOI: 10.32782/naturaljournal.12.2025.26

Tsytsyura, Y. G. (2025). Systemic analysis of the main components of the effect of long-term use of oil radish as an intermediate siderate on the soil quality index. *Ukrainian Journal of Natural Sciences*. 14, 250-269. DOI: 10.32782/naturaljournal.14.2025.24

Y. Tsytsyura (2026). Agronomy Research Development of an integrated soil quality index under prolonged green manure application of oilseed radish in crop rotation 24(1), 66-104, 2026 <https://doi.org/10.15159/AR.26.001>

Zaryshnyak A.S., Tsvei Y.P., Ivanina V.V. (2015). Optimization of fertilization and soil fertility in crop rotations. K.: Agrarian science. 208 p.

THE INFLUENCE OF FERTILIZER SYSTEMS AND PRECURSORS ON THE FERTILITY OF GRAY FORESTAL SOIL AND THE YIELD OF GRAIN MAIZE IN SHORT ROTATION CROP ROTATIONS

Oleksandr-Yaroslav PROTSAILO, ORCID: 0009-0009-2815-1314

Oksana KACHMAR, ORCID: 0000-0002-0382-6030

Institute of Agriculture of the Carpathian Region of the National Academy of Sciences

The article presents the results of research on the formation of effective fertility of gray forest soil for growing corn for grain in five-field field rotations under the influence of fertilization systems and precursors. It was established that the higher values of mobile forms of the main nutrients of plants during the growing season of the culture on unfertilized backgrounds were after the predecessors of soybean (in the seedling phase in the arable layer, the concentration level of easily hydrolyzable nitrogen compounds was 115.2-117.0 mg/kg, available phosphorus – 119.1-119.7, potassium – 104.4-105.4 mg/kg of soil) and wheat winter (according to the investigated nutrients: 113.1-113.6, 116.1-116.8 and 102.9-103.6 mg/kg of soil), lower - after potatoes and corn. The use of organo-mineral fertilization systems ensured the growth of soil fertility indicators. Higher values of easily hydrolyzable nitrogen, mobile forms of phosphorus and potassium during the growing season of corn for grain were formed on variants of rational and intensive fertilization systems with the simultaneous application of N120-150P100-120K100-120 directly under the crop against the background of by-products of the predecessor of winter wheat and plowing of post-harvest oil radish and contributed to obtaining 7.62-9.93 t/ha of crop grain.

Keywords: corn, precursors, fertilizers, soil fertility, nutritional regime, crop rotation.

This is an open-access article under the terms of the Creative Commons

Отримано: 20.7.2026

Погоджено до друку: 31.7.2026

Опубліковано: 30.9.2026

ВПЛИВ УДОБРЕННЯ ТА СИСТЕМИ ЗАХИСТУ ПОСІВІВ НА БІОМЕТРИЧНІ ПАРАМЕТРИ РОСЛИН ЯЧМЕНЮ ЯРОГО ЗА ВИРОЩУВАННЯ В УМОВАХ ЛІВОБЕРЕЖНОГО ЛІСОСТЕПУ

Володимир ГАНГУР, доктор сільськогосподарських наук, ORCID: 0000-0002-5619-492X
Олег КИРИЧОК, аспірант, ORCID: 0009-0003-3917-9714

Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, вул. Сковороди, 1/3, 36003, Україна
e-mail: volodymyr.hanhur@pdau.edu.ua

У статті наведено результати досліджень щодо впливу мінерального живлення, систем захисту та позакоренових підживлень на формування біометричних параметрів ячменю ярого в умовах Лівобережного Лісостепу. Встановлено, що внесення мінеральних добрив істотно підвищує кількість продуктивних стебел, забезпечуючи їх збільшення на 16,4–22,3% залежно від схеми удобрення та захисту посівів. Найвищі показники густоти стеблостою (до 519 шт./м²) формувалися за внесення N₄₀P₄₀K₄₀ у поєднанні з дробним азотним живленням (N₃₀ прикоренево), комплексним захистом і застосуванням біостимуляторів. Додаткове використання гумату калію та препарату Ярило «Супер азот» сприяло подальшому зростанню щільності продуктивного стеблостою на 3–11% порівняно з базовими варіантами. Висота рослин змінювалася у відносно вузькому діапазоні, що свідчить про помірну реакцію на чинники, що досліджували. Максимальний лінійний приріст рослин ячменю ярого (до 6,5%) відзначено за інтенсивного удобрення з дробним внесенням азоту та комплексним захистом із позакореновими підживленнями. Довжина колоса збільшувалася на 0,1–1,1 см (1,6–17,2%) залежно від рівня інтенсивності технології вирощування культури. Найвище значення цього показника отримано за внесення N₄₀P₄₀K₄₀ у поєднанні з підживленням N₃₀ та застосуванням біостимуляторів, що перевищувало контроль на 15,6%. Найбільш варіативним показником виявилася озерненість колоса, яка зростала на 8,8–27,6% за впливу мінерального живлення та інтенсифікації захисту. Позакоренові підживлення гуматом калію та препаратом Ярило «Супер азот» додатково підвищували кількість зерен у колосі на 3,0–14,9%. Отримані результати підтверджують доцільність інтегрованого підходу до формування продуктивності ячменю ярого шляхом поєднання оптимального удобрення, захисту рослин і біостимуляції.

Ключові слова: ячмінь ярий, мінеральні добрива, підживлення, густота стебел, висота рослин, довжина колоса, озерненість колоса.

Стаття з відкритим доступом на умовах ліцензії Creative Commons

Вступ

У структурі вітчизняного зерновиробництва ячмінь ярий (*Hordeum vulgare* L.) традиційно належить до стратегічних зернових колосових культур України, яка є другою за значущістю після пшениці озимої. Це зумовлено високим адаптивним потенціалом культури, продовольчою, кормовою і технічною цінністю та стабільним попитом на зерно як на внутрішньому, так і зовнішньому ринках (Al-Ragam et al., 2023; Hanhur et al., 2021; Hanhur et al., 2022). Завдяки високому вмісту екстрактивних речовин, солод, отриманий із зерна ячменю, слугує цінним джерелом поживних речовин для дріжджів під час процесу ферментації, що визначає його вагомість як базової сировини для пивоварної промисловості.

Що стосується площі посіву ячменю ярого, то варто відзначити її поступове скорочення впродовж останніх десятиліть, яке пов'язано із зміною структури посівних площ, переорієнтацією агропромисловості на більш комерційно привабливі культури, а також впливом кліматичних і економічних чинників. Згідно з даними Державної служби статистики України, площа посівів ячменю

ярого у 2010 р. становила 3033 тис. га, у 2020 р. – 1377 тис. га, а у 2025 р. – 790,2 тис. га. Таким чином, цей показник зменшився у 3,8 раза порівняно з 2010 р. та у 1,7 раза – відносно з 2020 р.

Ефективність вирощування ячменю ярого, ступінь реалізації його біологічного потенціалу продуктивності значною, мірою зумовлюється впровадженням інноваційних технологічних рішень, серед яких провідне місце належить застосуванню сучасних систем живлення. Саме раціональна система удобрення має істотний вплив на формування морфологічних характеристик рослин, сприяє утворенню та накопиченню сухої органічної речовини, а також підвищує їхню стійкість до несприятливих абіотичних чинників. Окремо слід підкреслити важливість оптимізації дози добрив за співвідношенням елементів живлення, з урахуванням господарського напрямку використання врожаю ячменю ярого, оскільки вимоги до біохімічного складу зерна у харчовій, кормовій та пивоварній галузях істотно різняться (Shkatula and Barskyi, 2022).

Оптимізація мінерального фону живлення сприяє інтенсифікації продукційного процесу, зокрема покращуючи умови для формування продуктивного стеблостою та нарощування вегетативної маси. Частка мінерального живлення у забезпеченні приросту врожайності зерна становить біля 40–50 % (Mazur, 2017). Згідно з висновками В. Д. Паламарчука, рівень продуктивності ячменю перебуває у безпосередній залежності від щільності продуктивного стеблостою, лінійних параметрів колоса а також кількості та масою зерна з нього (Palamarchuk, 2023).

Результати наукових досліджень свідчать, що на фоні застосування мінеральних добрив максимальні значення коефіцієнта загального кушіння (1,6) у ячменю ярого сорту Бравий було досягнуто за передпосівної обробки насіння інокулянтном Мікрогумін, а також за його поєднання з мікробіологічним препаратом Байкал. Аналогічну інтенсивність кушіння спостерігали у разі позакореневого внесення препарату Байкал у фазу кушіння (Chuhrii, 2023).

Дослідженнями О.О. Вінюкова (2018) встановлено, що найбільший коефіцієнт продуктивного кушіння ячменю ярого (1,44) формувалася за позакореневого підживлення посівів біостимулятором Регоплант на фоні внесення біогумусу одержаного шляхом переробки свинячого гною у біогазовій установці (500 кг/га) з $N_{15}P_{15}K_{15}$. Оптимізація системи живлення шляхом внесення повної норми мінеральних добрив $N_{30}P_{30}K_{30}$, а також поєднання біогумусу з $N_{15}P_{15}K_{15}$ та позакореневим підживленням посівів стимуляторами Регоплант і Стимпо, забезпечило формування найвищих показників структури врожаю. Зокрема, за цих умов маса 1000 зерен досягла 44,5–44,6 г, а озерненість колоса зросла на 1,8–2,5 шт. порівняно з контрольним варіантом. Слід відзначити, що всі варіанти дослідів із внесенням добрив забезпечили збільшення висоти рослин, зокрема на 2,3–5,2 см відносно контролю.

У дослідях, які проведено в умовах польової сівозміни Інституту рослинництва ім. В. Я. Юр'єва НААН встановлено, що внесення мінеральних добрив в дозі $N_{30}P_{30}K_{30}$ сприяло кращому формуванню елементів продуктивності пивоварних сортів ячменю ярого іноземної селекції, зокрема відзначено збільшення висоти рослин, довжини колоса та кількості зерен у колосі у сортів Quench (Швейцарія) і Skyway (Франція), відповідно на 3,8 і 6,6 см, 0,6 і 0,5 см та 1,6 і 0,9 шт., порівняно із варіантом без добрив (Porov et al., 2024).

Дослідженнями проведеними упродовж 2009–2011 рр. на базі Інституту кормів та сільського господарства Поділля НААН виявлено позитивний вплив різних рівнів удобрення і регуляторів росту на формування морфометричних параметрів рослин та продуктивність ячменю ярого. Так, максимальні значення показників, зокрема урожайності зерна

(6,39 т/га), кількості продуктивних стебел (618 шт./м²), зерен у колосі (24,9 шт.) та їх маси (1,01 г) було отримано за сівби сорту ячменю ярого Набат, застосування регулятора росту Терпал і внесення азотних добрив в дозі N_{90} на фоні $P_{45}K_{45}$ (Romaniuk, 2018).

Тому дослідження ефективності використання мінеральних добрив, зокрема дробного внесення азотних добрив у технологіях вирощування ячменю ярого є актуальними та необхідними, оскільки саме азатне живлення виступає потужним інструментом зміни морфометричних параметрів рослин та їхньої індивідуальної продуктивності. Метою дослідження було з'ясувати ефективність сумісного застосування мінеральних добрив та системи захисту посівів на формування біометричних показників та елементів продуктивності ячменю ярого.

Матеріали і методи

Польовий експеримент було проведено в умовах дослідного поля Полтавської державної сільськогосподарської дослідної станції ім. М.І. Вавилова ІС і АПВ НААН України впродовж 2024–2025 рр. Грунтовий покрив дослідної ділянки представлений чорноземом типовим малогумусним (за механічним складом – важкий суглинок). Вміст гумусу в орному шарі (0–30 см) становить 4,9 %. Відповідно до класифікації ґрунтів за вмістом органічної речовини (ДСТУ 4362:2004), такий рівень забезпеченості характеризується як високий. Для орного шару ґрунту властиві і наступні агрохімічні параметри: вміст азоту, що легко гідролізується (за Тюрнімом та Коновою) становить 127 мг/кг; рухомого фосфору (за Чириковим) – 130 мг/кг, обмінного калію (за Масловою) – 183 мг/кг ґрунту; Рн – 6,7.

Дослід закладено за наступною схемою: чинник А – удобрення (контроль (без добрив); $N_{20}P_{20}K_{20}$; $N_{20}P_{20}K_{20}+N_{30}$ (ВВСН 21–29); $N_{30}P_{30}K_{30}$; $N_{30}P_{30}K_{30}+N_{30}$ (ВВСН 21–29); $N_{40}P_{40}K_{40}$; $N_{40}P_{40}K_{40}+N_{30}$ (ВВСН 21–29)); чинник В – системи захисту посівів (мінімальна (протруювання насіння); комплексна (внесення пестицидів з урахуванням ЕПШ)); чинник С – позакореневе підживлення гуміновим стимулятором Гумат калію (1,0 л/га) та мікродобривом Ярило «Супер азот» (5 л/га) у фазу вихід у трубку (ВВСН 30–31). Посівна площа ділянки – 100 м², а облікова – 80,0 м². Повторність дослідів триразова. Розміщення варіантів і повторень – рандомізоване.

Попередник ячменю ярого у сівозміні – соя. Технологія вирощування культури загальноприйнята для зони, окрім чинників, що вивчали. Мінеральні добрива використовували у формі нітроамофоски (NPK: 15-15-15), аміачної селітри (N 34,4 %). Система захисту ячменю ярого передбачала застосування таких препаратів: фунгіцидний протруйник насіння Бастіон (дифеноконазол 30 г/л + ципроконазол 6,25 г/л) –

1,0 л/г; гербіцид – Гренадер максі (трибенурон-метил 562,5 г/кг + тифенсульфурон-метил 187,5 г/кг) – 35 г/га; інсектицид – Атрікс (альфа-циперметрин, 100 г/л) – 150 мл/га; фунгіцид – Полігард Максі (тебуконазол, 430 г/л) – 0,5 л/га. В досліді висівали сорт ячменю ярого Таманго, оригіном якого є Селекційно-генетичний інститут - Національний центр насіннєзнавства та сортовивчення. Сівбу культури проводили звичайним рядковим способом із шириною міжрядь 0,15 м. Норма висіву насіння ячменю ярого дорівнювала 5,0 млн. шт. на гектар схожих насінин.

Фенологічні спостереження за ростом і розвитком рослин, а також біометричні виміри проводили згідно методик (Volkodav, 2000; Yeshchenko et al., 2014).

Роки проведення досліджень (2024–2025 рр.) характеризувалися підвищеним температурним режимом та істотним дефіцитом опадів. Вегетаційний період 2024 р. характеризувався критичним недобором вологи атмосферних опадів навесні (50,3 мм проти 114,6 мм норми) та повною їх відсутністю у липні на фоні перевищення середньодобових температур на 3,7–3,9°C. Додатковим стрес-фактором став заморозок у травні (–0,5°C).

У 2025 р. температурна аномалія була найбільш вираженою у березні (перевищення норми на 6,5°C), а квітневий заморозок на поверхні ґрунту (–4,5°C) спричинив пошкодження надземної маси рослин. Дефіцит опадів навесні склав 51,6 мм, а червнева посуха (лише 16,4 мм опадів) у поєднанні

зі спекотним липнем (підвищення на 2,7°C відносно багаторічного значення) негативно вплинули на ріст і розвиток ячменю ярого.

Результати та обговорення

За усередненими результатами проведених досліджень встановлено, що застосування мінеральних добрив забезпечило збільшення кількості продуктивних стебел порівняно з контрольним варіантом (без добрив) за всіх схем захисту посівів (рис. 1). Найбільшу густоту продуктивного стеблостою спостерігали у варіанті максимальною дозою добрив та дробним внесенням азоту – $N_{40}P_{40}K_{40} + N_{30}$. У цьому варіанті кількість продуктивних стебел перевищувала показники контролю на 20,7–22,3%. Повне мінеральне удобрення ($N_{30}P_{30}K_{30}$) також засвідчує високу результативність, зокрема забезпечило формування від 474 до 512 шт./м² колососносних стебел, що на 19,1–21,5% більше за контроль. Дещо нижчу ефективність добрив порівняно з іншими варіантами відзначено за внесення їх за схемою $N_{20}P_{20}K_{20}$, однак і цей варіант удобрення стабільно перевищував контроль на 16,4–16,7% залежно від системи захисту. Результати досліджень одержані в умовах Правобережного Лісостепу також підтверджують, що дози та різні види добрив були основними чинниками, які мали найбільш виражений вплив на формування продуктивного стеблостою ячменю ярого (Voitova, 2021; Romaniuk, 2019).

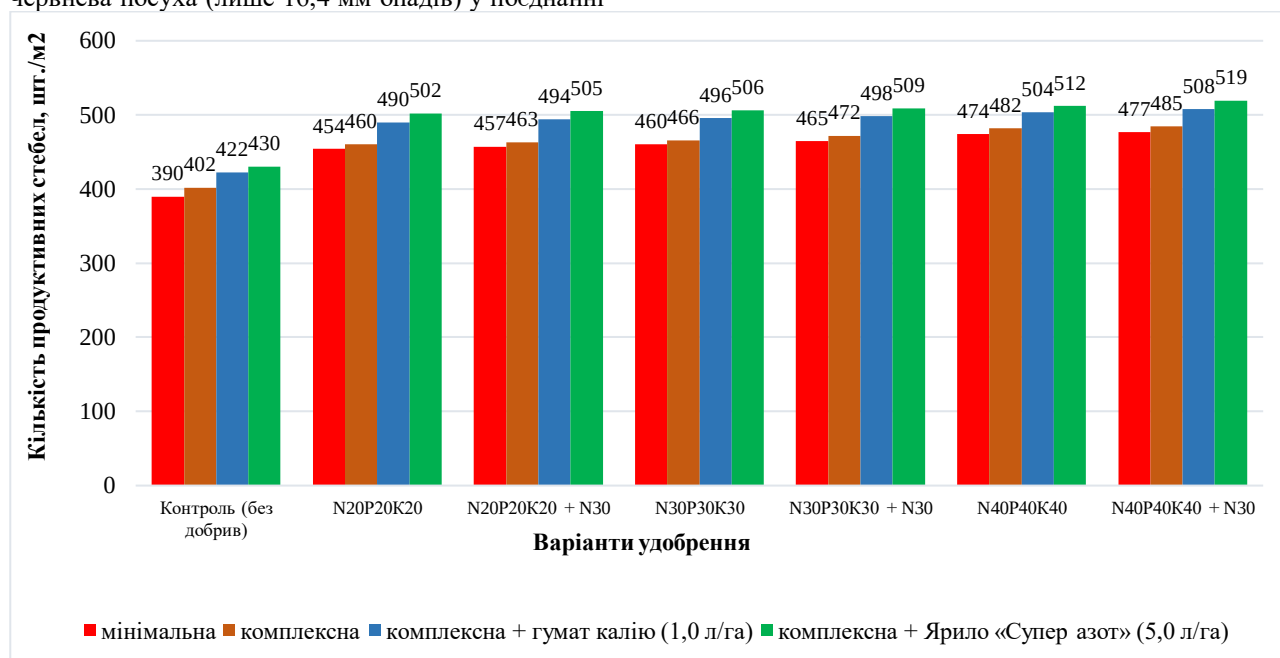


Рисунок 1. Вплив удобрення та системи захисту посівів на кількість продуктивних стебел, середнє за 2024–2025 рр.

Інтенсифікація захисту посівів та введення до схеми стимулятора і мікродобрива зумовили позитивну динаміку щодо збереження рослин та

продуктивного кущення. Так, за мінімального захисту формувалася найменша кількість продуктивних стебел, а перехід до комплексного

захисту посівів сприяв зростанню показника на 1,3–3,1% залежно від варіантів живлення. Виявлено, що найбільш виражений вплив на вище зазначений показник спостерігали у разі поєднання комплексного захисту з позакореневим підживленням. Так, застосування препарату Ярило «Супер азот» (5,0 л/га) на фоні $N_{40}P_{40}K_{40} + N_{30}$ виявилося найбільш результативним, забезпечивши формування максимальної щільності продуктивного стеблостою – 519 шт./м². Варіант із використанням Гумату калію (1,0 л/га) за ефективністю дещо поступався препарату Ярило «Супер азот», проте забезпечив зростання кількості колосоносних стебел на 20–31 шт./м² порівняно з базовим комплексним захистом. У дослідженнях,

які проводили упродовж 2021–2022 рр. на полях ТОВ «Органік-Д» також спостерігали збільшення кількості продуктивних стебел на фоні позакореневих підживлень азотними добривами (N_{35}). Так, у сортів Лофант, Гетьман, Вакула і Геліос густота продуктивного стеблостою перевищувала контроль, відповідно, на 8,1, 12,3, 9,7 і 12,1% (Palamarchuk, 2023).

Аналіз експериментальних даних свідчить, що висота рослин ячменю ярого змінювалася за впливу удобрення та системи захисту у відносно вузькому діапазоні, що свідчить про помірну чутливість цього показника до умов вирощування (рис. 2).

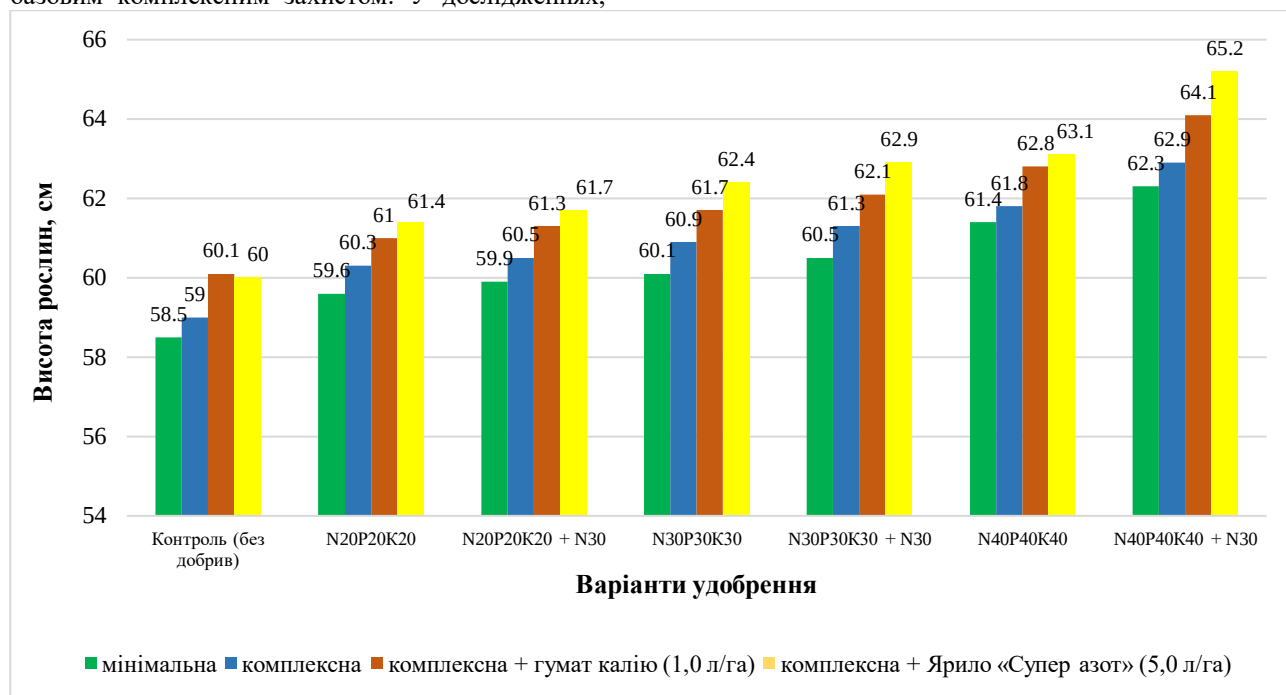


Рисунок 2. Вплив удобрення та системи захисту посівів на висоту рослин, середнє за 2024–2025 рр.

На варіанті без внесення мінеральних добрив інтенсифікація системи захисту забезпечувала незначне підвищення висоти рослин, зокрема перехід від мінімального до комплексного захисту супроводжувався приростом близько 0,5 см (менше 1%), тоді як застосування гумату калію та позакореневого азотного підживлення сприяло збільшенню показника на 1,5–1,6 см, або на 2,6–2,7% порівняно з базовим варіантом.

Внесення мінімальної дози мінеральних добрив ($N_{20}P_{20}K_{20}$) сприяло збільшенню висоти рослин ячменю ярого на рівні 1,1 см (1,9%) відносно контролю. Додаткове посилення системи захисту давало змогу підвищити цей показник ще на 1,3 см, тоді як застосування стимулюючих препаратів і мікродобрив сприяло його збільшенню, відповідно на 0,9–1,4 см (1,5–2,3%) порівняно з неудобреним фоном.

У варіанті з перенесенням азоту на підживлення ($N_{20}P_{20}K_{20} + N_{30}$) збільшення висоти

рослин відносно контролю становило 1,4–1,5 см (2,4–2,5%), тоді як використання гумату калію та позакореневого підживлення препаратом Ярило «Супер азот» підвищувало цей показник ще на 1,2–1,7 см, або на 2–2,8%.

Найбільш ефективним виявилося внесення мінеральних добрив у дозі $N_{40}P_{40}K_{40}$ та проведення прикореневого підживлення посівів культури азотом (N_{30}) у фазі кущення (ВВСН 21–29), де лінійні розміри рослин зросли на 3,8 см, або на 6,5% відносно контролю. Поєднання цього варіанту з комплексною системою захисту та позакореневими підживленнями забезпечувало додатковий приріст на 1,8–2,9 см (2,9–4,7%), що свідчить про кращу реалізацію потенціалу росту рослин.

Результати досліджень свідчать, що довжина колоса, як один із найважливіших структурних показників продуктивності, також помітно змінюється залежно від рівня живлення та інтенсивності системи захисту (табл. 1). Порівняно з

варіантом без добрив за мінімального захисту, оптимізація технології вирощування ячменю ярого, зокрема внесення мінеральних добрив, проведення прикореневого та позакореневого підживлення посівів дозволило досягти збільшення лінійних розмірів колоса на 0,1–1,1 см, що в межах досліді приріст становить від 1,6% до 17,2%.

Оцінюючи роль мінерального живлення, варто відмітити, що внесення повної норми добрив забезпечує стабільну перевагу над контрольним фоном на 6,3–10,9%. Найбільш ефективним, за впливом на параметри вище зазначеного показника, виявилось внесення добрив у дозі $N_{40}P_{40}K_{40}$, проведенням прикореневого підживлення азотом N_{30} і комплексного захисту посівів, що зумовило

подовження колоса на 0,9 см, або на 13,8% порівняно з аналогічним варіантом захисту на фоні без добрив.

Доповнення комплексної системи захисту позакореневим підживленням також мало позитивний вплив на формування лінійних параметрів колоса. Зокрема, застосування гумату калію та мікродобрива Ярило «Супер азот» дозволило додатково збільшити довжину колоса на 0,2 см або 3,1% порівняно з базовою комплексною схемою. Найвищий значення приросту довжини колоса зафіксовано на варіанті із внесенням $N_{40}P_{40}K_{40}$, проведенням прикореневого підживлення N_{30} та позакореневим застосуванням азотного мікродобрива, де його значення перевищувало базовий контроль на 15,6%.

Таблиця 1. Вплив удобрення та системи захисту посівів на довжину колоса, см (середнє за 2024–2025 рр.)

Варіант удобрення	Система захисту посівів			
	мінімальна	комплексна	комплексна + гумат калію (1,0 л/га)	комплексна + Ярило «Супер азот» (5,0 л/га)
Контроль (без добрив)	6,4	6,5	6,7	6,7
$N_{20}P_{20}K_{20}$	6,8	6,9	7,1	7,2
$N_{20}P_{20}K_{20} + N_{30}$	6,8	6,9	7,2	7,2
$N_{30}P_{30}K_{30}$	6,9	6,9	7,0	7,2
$N_{30}P_{30}K_{30} + N_{30}$	7,0	7,3	7,3	7,4
$N_{40}P_{40}K_{40}$	7,1	7,2	7,3	7,4
$N_{40}P_{40}K_{40} + N_{30}$	7,3	7,4	7,5	7,5

Аналіз експериментальних даних свідчить, що найбільш вираженою реакцією на фон мінерального живлення та систему захисту посівів була зміна кількості зерен у колосі ячменю ярого (табл. 2).

Так, на варіанті без добрив посилення системи захисту посівів сприяло збільшенню озерненості колоса, зокрема перехід від мінімального до комплексного захисту забезпечив

зростання кількості зерен на 2,3%, тоді як застосування гумату калію та позакореневого підживлення препаратом Ярило «Супер азот» підвищувало показник, відповідно на 11,0 і 14,9% відносно базового варіанту. Це свідчить про вагоме значення позакореневого живлення у формуванні генеративних органів навіть за відсутності фону основного удобрення.

Таблиця 2. Вплив удобрення та системи захисту посівів на кількість зерен в колосі (середнє за 2024–2025 рр.), шт.

Варіант удобрення	Система захисту посівів			
	мінімальний	комплексний	комплексний + підживлення гумат калію (1,0 л/га)	комплексний + підживлення Ярило «Супер азот» (5,0 л/га)
Контроль (без добрив)	18,1	18,6	20,1	20,8
$N_{20}P_{20}K_{20}$	19,7	20,0	21,2	21,6
$N_{20}P_{20}K_{20} + N_{30}$	20,1	20,3	21,4	21,8
$N_{30}P_{30}K_{30}$	19,9	20,4	21,6	21,6
$N_{30}P_{30}K_{30} + N_{30}$	20,3	20,5	21,9	21,9
$N_{40}P_{40}K_{40}$	21,0	21,8	22,4	22,8
$N_{40}P_{40}K_{40} + N_{30}$	21,2	21,8	22,6	23,1

Внесення різних доз повного мінерального добрива сприяло збільшенню кількості зерен у колосі на 8,8–16,0% порівняно з контролем за мінімального захисту. На фоні комплексного захисту цей приріст становив 7,5–17,2%, що

свідчить про більш виражене вирівнювання цього показника залежно від умов живлення. Додавання гумату калію до комплексної системи захисту забезпечило додаткове формування зерен у колосі – від 0,6–1,5 шт., що на 3,0–8,1% вище за показники

базового комплексного захисту. Використання препарату Ярило «Супер азот» зумовило збільшення кількості зерен у колосі на 1,0–2,2 шт., що на 4,6–11,8% перевищує показник аналогічного фону добрив за комплексного захисту.

Найвище значення озерненості колоса формувалося за внесення N40P40K40 азоту та

Висновки

За результатами досліджень впродовж 2024–2025 рр., встановлено, що інтенсифікація технології вирощування ячменю ярого за рахунок поєднання оптимального мінерального живлення та комплексного захисту посівів забезпечує зростання кількості продуктивних стебел у межах 16,4–24,3%, тоді як додаткові позакореневі обробки сприяють її підвищенню ще на 4,7–9,1%.

За даними польового експерименту виявлено, що оптимізація мінерального живлення сприяє підвищенню висоти рослин ячменю ярого на 1,9–6,5%, тоді як інтенсифікація системи захисту та застосування регуляторів росту і мікродобрив забезпечують додатковий приріст на рівні 2,9–4,7%. Це підтверджує, що висота рослин є відносно стабільною ознакою, яка реагує на агротехнічні

перенесення частини азоту у прикореневе підживлення (N30), а також повного захисту посівів та додавання гумату калію і препарату Ярило «Супер азот». На цьому фоні кількість зерен зростає відносно контролю на 20,4–27,6%.

заходи меншою мірою, ніж показники структури врожаю.

Дані дослідження підтверджують позитивну роль мінерального живлення, інтенсифікації системи захисту посівів ячменю ярого у синергії з стимулюючими препаратами та мікродобривами у формуванні потужнішого колоса, що є передумовою високої зернової продуктивності культури.

Виявлено, що застосування мінеральних добрив сприяє підвищенню озерненості колоса ячменю ярого в межах 8,8–17,1%, тоді як інтенсифікація системи захисту посівів і використання позакореневих підживлень забезпечують додаткове зростання цього показника на 3,8–14,9%.

Список використаної літератури

Al-Ragam, O., Al-Menaie, H. S., Al-Shatti, A., & Babu, M. A. (2023). Enhancing food security through identification of best performing barley cultivars under arid conditions. *Indian Journal of Agricultural Research*, 57, 6, 731–736. (In Indian). DOI: 10.18805/IJARE.AF-784

Chuhrii, H., Viniukov, O., Bondareva, O., & Sknypa, N. (2023). Vplyv mineralnogo ta orhanichnogo zhyvlennia na biometrychni pokaznyky ta vrozhaunist yachmeniu yaroho pry vykorystanni mikrobnykh preparativ ta rehuliatoriv rostu. Collection of Scientific Papers «SCIENTIA», (August 11, 2023; Amsterdam, Netherlands), 95–99. <https://previous.scientia.report/index.php/archive/article/view/1132> (In Ukrainian).

Derzhavna sluzhba statystyky. Ploshchi, valovi zbory ta urozhaunist silskohospodarskykh kultur za yikh vydamy [State Statistics Service. Areas, Gross Harvests and Yields of Agricultural Crops by Type]. URL: <https://www.ukrstat.gov.ua/> (data zvernennia: 15.04.2026)

Hanhur, V. V., Len, O. I., & Hanhur, M. V. (2021). Vplyv minimalizatsii obrobitku igruntu na volohozabezpechennia ta produktyvnist yachmeniu yaroho v zoni Livoberezhnoho Lisostepu Ukrainy [Impact of reduced tillage on moisture availability and productivity of spring barley in the Left-Bank Forest-Steppe zone of Ukraine]. *Visnyk Poltavskoi derzhavnoi ahrarnoi akademii*, 1, 128–134. (In Ukrainian). <https://doi.org/10.31210/visnyk2021.01.15>

Hanhur, V. V., Len, O. I., & Hanhur, M. V. (2022). Vplyv riznykh system obrobitku na pozhyvnyi rezhyt igruntu pid pshenytsiu ozymoiu ta yachmenem

yarym v zoni Livoberezhnoho Lisostepu Ukrainy [Impact of different tillage systems on the soil nutrient regime under winter wheat and spring barley in the Left-Bank Forest-Steppe zone of Ukraine]. *Visnyk Poltavskoi derzhavnoi ahrarnoi akademii*, 1, 38–44. (In Ukrainian). <https://doi.org/10.31210/visnyk2022.01.04>

Mazur, V. A., Palamarchuk, V. D., Polishchuk, I. S., & Palamarchuk, O. D. (2017). Novitni ahrrotekhnologii u roslinnystvi [Latest Agricultural Technologies in Crop Production]. Vinnytsia: FOP Rohalska I. O. (In Ukrainian).

Metodyka derzhavnogo sortovyprobuvannia silskohospodarskykh kultur [Methodology for State Variety Testing of Agricultural Crops] (2000). Derzh. komis. Ukrainy po vyprobuvanni ta okhoroni sortiv roslin. Za red. V. V. Volkodava. K. (In Ukrainian).

Palamarchuk, V. D. (2023). Morfolohichni osoblyvosti ta urozhaunist yachmeniu yaroho zalezno vid systemy udobrennia [Morphological Characteristics and Yield of Spring Barley Depending on the Fertilization System]. *Zernovi kultury*, 7, 2, 285–292. DOI: 10.31867 / 2523-4544/0288. (In Ukrainian).

Popov, S. I., Kuzmenko, N. V., Hutianskyi, R. A., Hlubokyi, O. M., & Mikhalov, I. A. (2024). Morfolohichni osoblyvosti ta urozhaunist sortiv yachmeniu yaroho pyvovarnoho napriamku vykorystannia zalezno vid umov vyroshchuvannia [Morphological Characteristics and Yield of Spring Barley Varieties for Brewing Use Depending on Growing Conditions]. *Zernovi kultury*, 8, 2, 246–255. <https://doi.org/10.31867/2523-4544/0336>. (In Ukrainian).

Romaniuk, V. I. (2018). Formuvannia vysokoproduktyvnykh posiviv yachmeniu yaroho zalezno vid faktoriv intensyfikatsii v umovakh Lisostepu Pravoberezhnoho [Formation of High-Productivity Spring Barley Crops Depending on Intensification Factors in the Right-Bank Forest-Steppe Conditions]. *Visnyk ahraryoi nauky*, 9 (786), 79–84. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk201809-12>. (In Ukrainian).

Romaniuk, V. I. (2019). Porivnialna otsinka konkurentospromozhnosti tekhnolohii vyroshchuvannia yachmeniu yaroho na zerno v umovakh Pravoberezhnoho Lisostepu [Comparative Evaluation of the Competitiveness of Spring Barley Grain Production Technologies in the Right-Bank Forest-Steppe Conditions]. *Naukovi dopovidi Natsionalnoho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy*, 2 (78), 161–172. <https://doi.org/10.31548/dopovidi2019.02.016>. (In Ukrainian).

Shkatula, Yu. M., & Barskyi, D. O. (2022). Formuvannia ploshchi lystkovoї poverkhni roslynamy yachmeniu ozymoho v zalezhnosti vid udobrennia [Formation of Leaf Area in Winter Barley Plants

Depending on Fertilization]. *Sil'ske hospodarstvo ta lisivnytstvo*, 1 (24), 227–240. DOI: 10.37128/2707-5826-2022-1-17 (In Ukrainian).

Viniukov, O. O. (2018). Vplyv orhanichnykh dobryv ta biostymulatoriv na rist i rozvytok roslyn yachmeniu yaroho v umovakh Donetskoi oblasti [Effect of Organic Fertilizers and Biostimulants on the Growth and Development of Spring Barley Plants under the Conditions of Donetsk Oblast]. *Tavriiskyi naukovyi visnyk*, 103, 10–16. (In Ukrainian).

Voitova, H. P. (2021). Vplyv system udobrennia na urozhainist yachmeniu yaroho v umovakh Pravoberezhnoho Lisostepu [Effect of Fertilization Systems on the Yield of Spring Barley under the Conditions of the Right-Bank Forest-Steppe]. *Zernovi kultury*, 5, 1, 72–77. <https://doi.org/10.31867/2523-4544/0161>. (In Ukrainian).

Yeshchenko, V. O., Kopytko, P. H., Kostohryz, P. V., & Opryshko, V. P. (2014). *Osnovy naukovykh doslidzhen v ahronomii: Pidruchnyk [Fundamentals of Scientific Research in Agronomy: Textbook]*. Vinnytsia: PP «TD «Edelweis i K»» (In Ukrainian).

EFFECT OF FERTILIZATION AND CROP PROTECTION SYSTEM ON THE BIOMETRIC PARAMETERS OF SPRING BARLEY PLANTS IN THE CULTIVATION CONDITIONS OF THE LEFT-BANK FOREST-STEPPE

Volodymyr HANHUR, ORCID: 0000-0002-5619-492X

Oleh KYRYCHOK, ORCID: 0009-0003-3917-9714

Poltava State Agrarian University

In this article, the results of studies of the effect of mineral nutrition, protection systems, and foliar fertilization on the formation of biometric parameters of spring barley under the conditions of the Left-Bank Forest-Steppe are presented. It was found that the application of mineral fertilizers significantly increases the number of productive stems, resulting in a 16,4–22,3 % increase depending on the fertilization scheme and crop protection methods. The highest stem density (up to 519 stems/m²) was formed when N₄₀P₄₀K₄₀ was applied in combination with split nitrogen fertilization (N₃₀ applied to the root zone), complex protection, and the use of biostimulants. The additional use of potassium humate and the Yarylo “Super Nitrogen” preparation resulted in a further increase in productive stem density of 3,0–11,0 % compared to the basic variants. Plant height varied within a relatively small range, indicating a moderate response to the factors studied. The maximum linear growth of spring barley plants (up to 6,5 %) was observed under intensive fertilization with split nitrogen applications and comprehensive protection involving foliar applications. Ear length increased by 0,1–1,1 cm (1,6–17,2%) depending on the level of intensity of the crop cultivation technology. The highest value of this parameter was received when N₄₀P₄₀K₄₀ was applied in combination with additional feeding of N₃₀ and the application of biostimulants, which exceeded the control by 15,6%. The most variable parameter was the number of grains per ear, which increased by 8,8–27,6 % under the influence of mineral fertilization and increased protection. Foliar applications of potassium humate and the Yarylo “Super Nitrogen” preparation further increased the number of grains per ear by 3,0–14,9 %. Отримані результати підтверджують доцільність інтегрованого підходу до формування продуктивності ячменю ярого шляхом поєднання оптимального удобрення, захисту рослин і біостимуляції. The obtained results confirm the effectiveness of an integrated method for improving spring barley productivity by combining optimal fertilization, plant protection, and biostimulation.

Keywords: spring barley, mineral fertilizers, feeding, stem density, plant height, ear length, grain yield.

This is an open-access article under the terms of the Creative Commons

Отримано: 24.4.2026

Погоджено до друку: 8.6.2026

Опубліковано: 30.9.2026

**ДИНАМІКА НАКОПИЧЕННЯ НІТРАТІВ У БУЛЬБАХ РАННЬОСТИГЛИХ СОРТІВ КАРТОПЛІ
ЗАЛЕЖНО ВІД ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМИ УДОБРЕННЯ**

Андрій ДАРМАНСЬКИЙ, аспірант, ORCID: 0009-0004-1363-9302

Інститут сільського господарства Карпатського регіону НААН
вул. Грушевського, 5, с. Оброшине, Львівський р-н, Львівська обл., 81115, Україна
e-mail: darmanskiy.iagro@gmail.com

Завдяки інтенсифікації складових виробництва і залучення нових елементів технології вирощування сільськогосподарських культур, вміст нітратів у продукції рослинництва та відповідно продуктах, що виробляються, часто перевищує допустимі граничні концентрації. Основним чином нітрати до людського організму надходять з овочами, фруктами та ягодами і на їх частку припадає близько 70 % добової дози, решта потрапляє з водою та іншими продуктами. Метою дослідження було визначити вплив системи удобрення та величини посадкової фракції на адаптивні властивості та накопичення вмісту нітратів у бульбах ранньостиглих сортів картоплі в умовах південної частини Західного Лісостепу України. У статті наведено результати комплексної оцінки сортів картоплі ранньостиглих сортів Спас та Слаута за вмістом нітратів і їх вміст коливалися відповідно кожного окремо взятого сорту, а частка становила від 68,4 до 109,5 мг/кг сирої ваги. Максимальні показники вмісту нітратів у сорту картоплі Спас відмічено на варіанті з внесенням мінеральних добрив $N_{90}P_{90}K_{120}$ + стимулятор росту нова-Марін + мікродобрива нова-Макро і за висадки бульб величиною 28-40 мм склав у середньому за три роки проведення досліджень 84,3 мг/кг, а за висадки бульб величиною 40-60 мм найвищим показник був на варіанті з внесенням $N_{90}P_{90}K_{120}$ + стимулятор росту нова-Марін і становив – 75,7 мг/кг. У сорту Слаута найвищі показники відмічено за внесення мінеральних добрив $N_{90}P_{90}K_{120}$ + стимулятор росту нова-Марін + мікродобрива нова-Макро та посадки бульб обох фракцій і склав відповідно – 108,5 та 109,5 мг/кг сирої наважки. Окремим висновком що впливає з отриманих результатів проведеного дослідження є те, що задля поліпшення якості картоплі можливо застосувати такі чинники, як правильний вибір сорту для задоволення вимог щодо вмісту сухої речовини та удосконалені елементів технології вирощування.

Ключові слова: картопля, величина посадкової фракції, живлення, стимулятор росту, мікродобриво, нітрати.

Стаття з відкритим доступом на умовах ліцензії Creative Commons

Вступ

Здоров'я людини переважно залежить від впливу факторів зовнішнього природного середовища і якості харчових продуктів, що вона споживає. Безвідповідальне, споживацьке відношення людини до біосфери призводить до того, що рослинний та тваринний світи також стають небезпечними по відношенню для неї. У процесі обробки сировини до готової продукції виникають екологічні проблеми, що обумовлюють безпеку харчування. Безпечність продуктів харчування є важливим, актуальним і невідкладним завданням не лише науковців, а й безпосередньо виробників у господарствах, виробників продуктів та контролюючих державних органів. Безпека продуктів повинна зводитись до відсутності шкідливого впливу на здоров'я людини внаслідок споживання (Andrews M, 1986; Hanchuk V.D., 2012).

Азот є необхідним елементом для всіх життєвих форм. У процесі обігу азоту в природному середовищі за час розщеплення білкових форм та інших азотовмісних речовин проходить процес виділення аміаку. Нітрифікуючі бактерії окиснюють його до нітратів, а ті, в свою чергу, перетворюються на нітрити, а в подальшому під дією денітрофікуючих бактерій останні знову

перетворюються на азот, який знову ж таки потрапляє до атмосферного середовища. У ґрунт азот потрапляє чи надходить за внесення різних видів добрив, рослинними та кореневими залишками, солями з амонійним та азотнокислим складом, які містяться в талій (сніговій) та дощовій водах (Kostenko E. E. et al., 2020; Panasenko T.V. & Krasnorutska K.I., 2016).

Нітрати – це природні продукти обміну всіх рослин без яких неможливий процес їхнього повноцінного росту і розвитку. Слід відзначити, що неконтрольоване застосування азотних добрив може призвести до накопичення у продуктах рослинного походження їх необмеженого рівня (Zhou Z.Y., 2000). Аналіз літературних джерел, як вітчизняних, так закордонних, вказує на те, що на сьогодні рівень забруднення сировини рослинного походження, нітратами - високий. До основних факторів, що спонукають накопиченню нітратів в продукції овочівництва, відносяться такі чинники: метеорологічні фактори, агротехнічні умови, рівень родючості ґрунтів, сортові ознаки (Panchenko T. I. & Mandebura S.V., 2018).

Науковцями ряду установ проведено дослідження овочів, що районовані у східних

регіонах України, на предмет накопичення умісту токсичних речовин, залежно від їх видової та сортової належності (картопля, морква, буряк, гарбуз, перець, кабачки, томати, ревіль, агрус та т. і.). Ці дослідження дали змогу виявити найбільш «безпечні» сільськогосподарські культури та сорти, а вивчення закономірностей надходження і накопичення в рослинах нітратів є необхідним для правильного обґрунтування розробки заходів, що знижують їхній вміст у готовій продукції (Kharitonov M. M., et al., 2015).

Рядом науковців охарактеризовано токсичну дію нітратів і встановлено, що перевищення їх допустимого рівня викликає інтоксикацію організму людини (Shutyuk V et al., 2015; Panasenکو T. V. & Krasnorutska K. I.,), Проведення експериментальних досліджень показало, що кількісне визначення вмісту нітрат-іонів у продуктах харчування рослинного походження дало результати перевищення ГДН в 2,5 рази у помідорах, які вирощені в тепличних умовах. Вченими інституту екології і токсикології імені Л. І. Медведя та Національного медичного університету ім. О. О. Богомольця було досліджено вміст нітратів, нітритів і нітрозоамінів у харчових продуктах і раціонах та визначено параметри їх токсичності для людського організму, а також встановлено, що у випадку тривалого вживання забруднених нітратами овочів розвивається хронічна інтоксикація. Під час вживання продуктів з підвищеним вмістом нітратів в організм людини надходять не тільки нітрати, але й їх метаболіти: нітрити і нітрозо сполуки (Smolyar V. I. et al., 2007).

Ряд зарубіжних науковців стверджують, що технологічна обробка рослинної продукції сприяє зменшенню в ній накопичених нітратів. Такі заходи, як промивання та механічне очищення овочів знижує їх вміст на 3–10%, вимочування – на 20–30 %, варіння або ж термічна обробка – на 20–80 %, хоча при цьому смаження – лише на 10 %, а квашення, консервування чи маринування – на 50–70 %. За їхніми ж даними, Всесвітня організація охорони здоров'я (ВООЗ) встановила допустиму дозу нітратів – 5 мг/кг ваги людини, хоча в нашій державі допустимі норми до нітратів менш жорсткі відносно європейських (Anjana, Umar S. et al., 2007; Santamaria P., 2006).

Основними чинниками, що впливають на надмірне накопичення вмісту нітратів у сільськогосподарській продукції є неконтрольоване застосування високих доз азотних добрив з метою отримання максимально швидкої вигоди, незадовільне та неякісне проведення підготовчих робіт щодо їх внесення, що в свою чергу призводить до нерівномірного розподілу азотних добрив на поверхні поля, надмірне підживлення культур азотом, порушення балансового співвідношення між азотом, фосфором і калієм, низький рівень культури землеробства і низька технологічна дисципліни за проведення польових робіт, ігнорування і

недотримання науково обґрунтованих сівозмін та відсутність сортової політики і переважання монокультури, низька ефективність впровадження наукових розробок у практику та відсутність належного ефективного контролю як за ходом виконуваних робіт, так і за якістю кінцевого продукту (Tsyganenko O. I., 2005; Chen B. M. et al., 2004).

Добрива, що вносяться в надмірних кількостях (понад 16–18 т/га сівозміни) з урахуванням і мінеральних, спричиняють до нагромадження нітратів у кінцевій продукції. Ще одним негативним чинником є те, що за тривалого зберігання продукції рослинництва з накопичених нітратів утворюються нітрити, які є більш токсичними і небезпечними для споживачів, ніж нітрати (Opol N. I. & Dobryanskaya E. V., 1986).

Дослідження щодо накопичення нітратів в основному проводили з плодоовочевою продукцією (борщовий набір та ряд кісточкових плодів культур). Вміст нітратів у овочах та показники допустимих меж коливаються залежно від термінів збирання врожаю, місцевості і кліматичних умов, структури ґрунту і його вологості. Але найбільш важливим агротехнічним чинником є методи і кількість внесення азотних добрив під кожен окремо виділену культуру (Barvinchenko V. I., 2004).

На вміст нітратів в овочах впливає тип та гранулометричний склад ґрунту. На важких ґрунтах через їх спроможність високого ступеню поглинання азоту нітратів накопичується значно більше. Досліджено, що стосовно ґрунтів із низьким вмістом фосфору, калію та основних мікроелементів дози внесення азотних добрив зменшують, а для дуже кислих (рН, KCL < 4) і зі значним вмістом мінерального азоту їх використання взагалі не рекомендоване та заборонено (Doroguntsov S. I., 2005; Santamaria P., 1999).

Аналіз вітчизняної та закордонної літератури свідчить, що нині час рівень забруднення рослинної сировини нітратами є доволі високим, а тому проведення досліджень в цьому напрямку мають актуальність там наукову новизну.

Матеріали і методи

Дослідження проводили на полях приватного підприємства «АВС-АГРО», що розміщене у селі Кугаївці Чемеровецького району Хмельницької області. Попередником картоплі були озимі зернові з післяжнивним посівом сидеральних сумішок (гірчиця біла, ріпак та жито).

У ґрунтовому покриві господарства, переважають чорноземи глибокі малогумусні, в значно меншій кількості чорноземи сильно реградовані сірі і в невеликій кількості – чорноземи слабореградовані, на яких вирощуються всі сільськогосподарські культури.

Ґрунтовий покрив дослідної ділянки представлений чорноземами глибокими малогумусними середньосуглинковими. Його орний

шар (0-30 см) має такі агрохімічні показники: вміст гумусу (за Тюрнімом) 4,42 %, рН сольової витяжки – 6,5, гідролітична кислотність – 1,44 мг/екв./100 г, сума обмінних основ – 35,2 мг/екв./100 г, легкогідролізованого азоту (за Корнфілдом) – 12,0 мг/100 г, рухомого фосфору і обмінного калію (за Чириковим), відповідно, 17,1 і 17,8 мг/100 г ґрунту. Рухомих форм бору (за Бергером і Труогом) – 6,3 мг/100 г, марганцю – 246 мг/100 г, міді – 2,1 мг/100 г, цинку – 4,7 мг/100 г, кадмію – 0,6 мг/100 г, свинцю – 6,2 мг/100 г ґрунту. Глибина гумусово-елювіального горизонту досягає 120 см, перехід до ілювіального горизонту поступовий, гумусове забарвлення втрачається з глибиною.

Порівняно з іншими чорноземами, дуже глибокі та глибокі мають найбільшу зритість, що і обумовлює таку розтягнутість гумусового горизонту в порівнянні з середньо-забезпеченими. Рухомість фосфатів знаходиться в оберненій залежності від насиченості ґрунту основами.

Глибокий гумусний горизонт із зернисто-грудкуватою структурою обумовлює сприятливий водно-повітряний режим ґрунту – аерацію, високу вологоємкість та добру водопроникність. Ґрунт добре окультурений, насичений гідроксидами кальцію і магнію. Агрохімічний бал – 74. Еколого-агрохімічний бал – 69. Реакція ґрунтового розчину нейтральна.

За природно-кліматичними умовами південна частина Західного Лісостепу є сприятливою для вирощування ранньостиглих сортів картоплі. Проте, навіть в межах однієї області створюються метеорологічні умови, які можуть обумовити різницю врожайності за роками, тому що на її формування істотний вплив має не лише оптимальна кількість опадів, а їх розподіл за місячними нормами в період росту і розвитку рослин картоплі. Адже за останні роки за вирощування картоплі, буває так, що в період найбільшої потреби рослин у вологості опади не випадають, або навпаки – випадають в той час, коли рослинам картоплі волога вже менш потрібна.

Дослідження проводили з метою агробіологічного обґрунтування урожайності ранньостиглих сортів картоплі в умовах південної частини Західного Лісостепу України, з урахуванням потреб адаптації технологій до змін клімату та завдань сталого розвитку виробництва аграрної продукції. Досліди закладали за трьохфакторною схемою з вивченням впливу:

- 1) сортових особливостей (сортів Спас та Слаута);
- 2) фракція садивних бульб (28-40 та 40-60 мм);
- 3) застосування основного живлення в сукупності стимулятором росту (нова-Марін) та основного живлення та стимулятора росту і мікродобрива (нова-Марін та нова-Макро).

Характеристика сортів картоплі. **Спас** - дуже урожайний ранній сорт столової картоплі

селекції Інституту сільського господарства Карпатського регіону НААН, що підготовлено до передачі на Державну науково-технічну експертизу. Сорт підходить для вирощування в усіх природних зонах нашої країни, найкраще стосовно ґрунтово-кліматичних умов Західного Лісостепу. Ранню картоплю можна копати вже в другій половині червня-початку липня. Сорт картоплі раннього терміну досягання - до 60-65 днів від появи сходів до збирання; для свіжого споживання і зимового зберігання; кущі - середнього розміру, утворюють в середньому 10-12 бульб округлої форми зі шкіркою рожевого забарвлення з світлим забарвленням вічка та світло-кремового кольору м'якушем, що містить до 16,0 % крохмалю; дуже висока врожайність - до 400-450 кг з 1 сотки, хороші смакові якості - 8,6 балів з 10 можливих, середньорозваристий сорт, при кулінарній обробці м'якуш не темнішає, придатний для картоплі-фрі; сорт картоплі стійкий до нематоди, фітофторозу та інших захворювань; добре переносить механізоване збирання врожаю, транспортування та зберігання.

Слаута - дуже урожайний ультраранній сорт столової картоплі селекції Інституту картоплярства НААН. Сорт підходить для вирощування в усіх природних зонах нашої країни - найбільш ранню картоплю можна копати вже в червні, а в південних областях сорт можна вирощувати і як двоврожайну культуру. Сорт картоплі раннього терміну досягання - 55-60 днів від появи сходів до збирання; для свіжого споживання і зимового зберігання; кущі - середнього розміру, утворюють в середньому 10 бульб, копати на їжу можна вже в другій половині червня/липні; бульби - округлої форми зі шкіркою червоного забарвлення і кремового кольору м'якушем, що містить до 15,4 % крохмалю; дуже висока врожайність - аж до 500 кг з 1 сотки, хороші смакові якості - 8,6 балів з 10 можливих, середньорозваристий сорт, при кулінарній обробці м'якуш не темнішає; сорт картоплі стійкий до нематоди, фітофторозу та інших захворювань;

Характеристика стимулятора росту та мікродобрива, що включено у проведення досліджень. **Нова-Марін** - комплексний біостимулятор-антистесант на основі екстракту водорості *Ascophyllum nodosum* та амінокислот рослинного походження. Збагачений макро- та мікроелементами. Норми внесення для овочевих культур - 1-2 л/т насіннєвого матеріалу.

Дія та фізіологічний вплив на рослину: стимулювання ферментативної та фотосинтетичної активності; стимуляція ділення, росту та диференціації клітин; активація росту кореневої системи; підвищення загальної стресостійкості, ефективний захист від дії посухи та високих температур; підвищення ефективності внесених добрив; активація природного захисту рослин від патогенів; подолання різних видів стресу;

підвищення врожайності та якості продукції рослинництва.

Як складова стимулятора росту, водорості *Ascophyllum nodosum* - цей вид був зустрічається в Європі в Ірландії, на Фарерських островах, в Норвегії, у Великій Британії і на острові Мен, в Нідерландах, в Північній Америці в затоці Фанді, Новій Шотландії. Він також був зареєстрований як випадкове явище поблизу Сан-Франциско, Каліфорнія, але був викорінений як потенційний інвазивний вигляд. Водорість схильна до впливу екстремальних погодних умов і здатна рости як при високих так і низьких температурах (-20 °C взимку до + 40 °C влітку).

Ascophyllum nodosum збирається для використання в альгінатах, добривах та виробництві борошна з морських водоростей для споживання тваринами та людьми. Він тривалий час використовувався як органічне та основне добриво для багатьох сортів сільськогосподарських культур через його поєднання як макроелементів (N, P, і K), так і мікроелементів (Ca, Mg, S, Mn, Cu, Fe, Zn тощо). Він також містить цитокиніни, ауксин-подібні гібереліни, бетаїни, маніт, органічні кислоти, полісахариди, амінокислоти та білки, які є дуже корисними і широко використовуються в сільському господарстві.

Мікродобриво нова-Макро - висококонцентроване фосфорно-калійне добриво з фунгіцидним ефектом, що містить фосфор і калій у спеціальній формі, надзвичайно доступний для рослин. Призначене для швидкого усунення дефіциту макро- та мікроелементів у рослині та покращення засвоєння елементів живлення з ґрунту. Рекомендована норма витрат добрива – 1-2 л/га.

Дія препарату: ліквідація дефіциту мікроелементів; підвищення ступеню засвоєння поживних речовин; корегування системи удобрення рослин у разі дефіциту в ґрунті важливих мікроелементів, а також в інтенсивних технологіях за вирощування високих врожаїв; активація біологічної активності рослин у відповідальні періоди росту і розвитку для формування максимально можливої урожайності.

Технологія вирощування картоплі – загальноприйнята стосовно зони Західного Лісостепу, основне живлення – нітроамофоска ($N_{16}P_{16}K_{16}$) збалансована калімагnezією ($K_{28}Mg_8S_{15}$). Протягом вегетаційного періоду проводили фенологічні спостереження, відмічали всі фази росту рослин картоплі. Проведені дослідження відповідають нормам Держстандартів України й вимогам ISO-17025 та виконано з використанням методичних підходів відповідно до міжнародних практик. Закладка варіантів дослідження, площа ділянок за обліковими параметрами, їх повторність проведено згідно: «Картоплярство: методика дослідної справи», «Методичних рекомендацій по вивченню вихідного селекційного матеріалу сільськогосподарських культур», «Методичних

рекомендацій щодо проведення досліджень з картоплею».

Результати та обговорення

Рання (молода) картопля є одним із перших весняно-літніх «делікатесів», проте вона часто викликає занепокоєння через ризик пов'язаний з накопичення потенційно високого вмісту нітратів, що зумовлене як біологічними особливостями розвитку бульб, так і окремими елементами технології їхнього прискореного вирощування.

Максимальна концентрація нітратів у рослинах, а саме у бульбах картоплі спостерігається в період їхнього активного росту. У недозрілих овочах і ранній картоплі рівень цих сполук зазвичай вищий, ніж у бульбах, які досягли повної фізіологічної зрілості восени. Основні фактори накопичення включають такі чинники, як надлишкове живлення, а саме - для отримання надраннього врожаю аграрії часто вносять великі дози азотних добрив та обмежений доступ сонця та тепла - ранню картоплю часто вирощують у теплицях або під агроволокном. За умов недостатнього освітлення та низьких температур природні процеси переробки нітратів у безпечні амінокислоти суттєво сповільнюються.

Дослідженнями проведеними в 2024-26 рр. встановлено, що показники накопичення нітратів у сорту Спас коливались в середньому у межах 64,2-84,3 мг/кг сирої речовини за посадки фракцією 28-40 мм та 73,2-75,7 мг/кг сирої речовини за посадки фракцією 40-60 мм та були значно нижчими встановленої для ранньої картоплі гранично допустимої норми у 250 мг/кг.



Сорт картоплі Спас (контрольний варіант без внесення добрив)

Відносно контрольного варіанту, де не проводилось жодних обробітків та не вносилося живлення показники вмісту накопичених нітратів були низькими і склали відповідно величині зазначених посадкових фракцій 68,4 та 73,2 мг/кг. Внесення мінеральних добрив у рекомендованій дозі згідно технології вирощування збільшило показник накопиченого вмісту нітратів на 10,2 мг/кг відносно посадкової фракції 28-40 мм та на 0,5 мг/кг відносно посадкової фракції 40-60 мм.

Додаткове застосування стимулятора росту нова-Марін незначно підвищило вміст нітратів, на

0,9 мг/кг, відносно контрольного варіанту та зменшило їх кількість на 0,9 мг/кг в порівнянні з рекомендованою дозою живлення стосовно посадкової фракції 28-40 мм. На нашу думку, причиною зниження вмісту накопичення нітратів у цьому випадку стала дії стимулятора росту на пришвидшення процесів розвитку та формування сухої речовини у бульбах картоплі.

За посадки бульб величиною 40-60 мм відслідковується поступове збільшення вмісту нітратів

відносно усіх попередніх варіантів проведення дослідження – на 2,5 мг/кг відносно контролю та на 2,0 мг/кг відносно дози внесення мінеральних добрив.

Найвищим показник накопичення нітратів у ранньостиглого сорту картоплі Спас відмічено на варіанті з внесення мінеральних добрив $N_{90}P_{90}K_{120}$ + стимулятор росту нова-Марін + мікродобрива нова-Макро за посадки фракцією 28-40 мм і коливався на рівні 84,3 мг/кг сирої речовини (табл. 1)

Таблиця 1. Показники накопичення вмісту нітратів у картоплі ранньостиглого сорту Спас на 85-й день після садіння, 2024-2026 рр.

Фракція	Варіанти дослідження*	сорт Спас			
		2024	2025	2026	Середнє за 2024-2026 рр.
28-40 мм	Без добрив (контроль)	63,7	70,7	71,0	68,4
	$N_{90}P_{90}K_{120}$ (р. д.)	77,8	78,9	79,2	78,6
	$N_{90}P_{90}K_{120}$ + стимулятор росту нова-Марін	49,2	79,3	79,4	69,3
	$N_{90}P_{90}K_{120}$ + стимулятор росту нова-Марін + мікродобрива нова-Макро	85,7	82,5	84,7	84,3
40-60 мм	Без добрив (контроль)	77,8	70,8	71,0	73,2
	$N_{90}P_{90}K_{120}$ (р. д.)	63,7	78,4	79,0	73,7
	$N_{90}P_{90}K_{120}$ + стимулятор росту нова-Марін	68,2	79,6	79,5	75,7
	$N_{90}P_{90}K_{120}$ + стимулятор росту нова-Марін + мікродобрива нова-Макро	63,7	79,8	80,1	74,5

Примітка: дані зведено і опосередковано з трьох повторень. Аналіз проведено у Львівському регіональному центрі ДУ «Держгрунтохорона».



Ранньостиглий сорт картоплі Слаута у фазу бутонізації-цвітіння

Аналіз даних проведення дисертаційного дослідженнями показав, що показники накопичення нітратів у сорту Слаута на 85-й день після садіння або ж за 15 днів до початку збирання коливались в середньому у межах 99,6–108,5 мг/кг сирої речовини за посадки фракцією 28-40 мм та 92,3-109,5 мг/кг сирої речовини за посадки фракцією 40-60 мм та і як

вже попередньо відзначалось, були значно нижчими гранично допустимої норми.

На контрольному варіанті показники вмісту накопичених нітратів склали відповідно величині зазначених посадкових фракцій 113,4 та 92,3 мг/кг. Внесення мінеральних добрив у рекомендованій дозі згідно технології вирощування зменшило вміст нітратів для посадкової фракції 28-40 мм на 1,7 мг/кг та збільшило їх вміст на 11,3 мг/кг відносно посадкової фракції 40-60 мм

Найвищим показник накопичення нітратів у ранньостиглого сорту картоплі Слаута відмічено на варіанті з внесення мінеральних добрив $N_{90}P_{90}K_{120}$ + стимулятор росту нова-Марін + мікродобрива нова-Макро за посадки фракціями 28-40 та 40-60 мм і склав відповідно 108,5 та 109,5 мг/кг сирої речовини (табл. 2).

Пропозиції

Поліпшити якість картоплі можливо за допомогою правильного вибору сорту для задоволення вимог щодо вмісту сухої речовини та удосконалених елементів технології вирощування.

Таблиця 2. Показники накопичення вмісту нітратів у картоплі ранньостиглого сорту Слаута на 85-й день після садіння, 2024-2026 рр.

Фракція	Варіанти дослідження*	сорт Слаута			
		2024	2025	2026	Середнє за 2024-2026 рр.
28-40 мм	Без добрив (контроль)	118,7	109,6	112,0	113,4
	N ₉₀ P ₉₀ K ₁₂₀ (р. д.)	108,7	109,4	117,2	111,7
	N ₉₀ P ₉₀ K ₁₂₀ + стимулятор росту нова-Марін	84,3	105,3	109,4	99,6
	N ₉₀ P ₉₀ K ₁₂₀ + стимулятор росту нова-Марін + мікродобрива нова-Макро	105,4	105,3	114,7	108,5
40-60 мм	Без добрив (контроль)	63,7	102,1	111,0	92,3
	N ₉₀ P ₉₀ K ₁₂₀ (р. д.)	88,9	102,9	119,0	103,6
	N ₉₀ P ₉₀ K ₁₂₀ + стимулятор росту нова-Марін	81,7	101,2	119,5	100,8
	N ₉₀ P ₉₀ K ₁₂₀ + стимулятор росту нова-Марін + мікродобрива нова-Макро	109,4	101,0	118,1	109,5

Примітка: дані зведено і опосередковано з трьох повторень. Аналіз проведено у Львівському регіональному центрі ДУ «Держгрунтохорона».



**Сорт картоплі Слаута
на 85-й день після садіння**

Висновки

Вміст нітратів у рослинах залежить в першу чергу від їх біологічних властивостей та елементів

Список використаної літератури

Andrews M. The partitioning of nitrate assimilation between root and shoot of higher plants: mini review. *Plant Cell Environ.* 1986, № 9, P.511–519. <https://doi.org/10.1111/1365-3040.ep11616228>.
Anjana Umar S., Iqbal M., Abrol Y. P. Accumulation of nitrates in plants, factors influencing this process and consequences for human health. *Review. Agron.Sustain.Dev.*, 2007. Vol. 27. P. 45–57. <http://dx.doi.org/10.1051/agro:2006021>

технології вирощування стосовно зони вирощування культури. Слід зауважити, що самі по собі нітрати харчових продуктів не завдають великої шкоди здоров'ю людини.

Підсумовуючи вищезгадане, зауважимо, що вся, отримана за варіантами дослідження, рослинна продукція відповідала гігієнічним нормам. Досліджені зразки картоплі ранньостиглих сортів Спас та Слаута за вмістом нітратів коливалися відповідно кожного окремо взятого сорту і частка їх становила від 68,4 до 109,5 мг/кг сирої ваги. Максимальні показники вмісту нітратів у сорту картоплі Спас відмічено на варіанті з внесенням мінеральних добрив N₉₀P₉₀K₁₂₀ + стимулятор росту нова-Марін + мікродобрива нова-Макро і за висадки бульб величиною 28-40 мм склав у середньому за три роки проведення досліджень 84,3 мг/кг, а за висадки бульб величиною 40-60 мм найвищим показник був на варіанті з внесенням N₉₀P₉₀K₁₂₀ + стимулятор росту нова-Марін і становив – 75,7 мг/кг.

У сорту Слаута найвищі показники відмічено за внесення мінеральних добрив N₉₀P₉₀K₁₂₀ + стимулятор росту нова-Марін + мікродобрива нова-Макро та посадки бульб обох фракцій і склав відповідно – 108,5 та 109,5 мг/кг сирої наважки.

Barvinchenko V.I. *Soils of Vinnytsia region.* Vinnytsia. 2004. 46 p.
Doroguntsov S. I. *Ecology.* Kyiv: KNEU, 2005. 371 p.
DSTU 4948:2008 "Fruits, vegetables and their processing products. Methods for determination of nitrate content". http://online.budstandart.com/ua/catalog/docpage?id_doc=83097

Effects of nitrate supply on plant growth, nitrate accumulation, metabolic nitrate concentration and nitrate reductase activity in three leafy vegetables / Chen B.M. et al. *Plant Sci.* 2004. Vol.167, P. 635–643. <http://dx.doi.org/10.1016/j.plantsci.2004.05.015>

Kharitonov M.M., Lazareva O.M., Lemishko S. M. Ecological assessment of the variability of nitrate content in vegetable and fruit and berry cultures in the Dnipropetrovsk region. *Bulletin of the Poltava State Agrarian Academy.* 2015. №. 3. P.29–31. http://nbuv.gov.ua/UJRN/VPDAA_2015_3_7.

Monitoring of nitrates and measures to reduce them in plant / Hanchuk V.D. *Eastern European journal of advanced technologies.* 2012. № 6/6 (60). P.47–48.

Monitoring of nitrates and measures to reduce them in plant products / Kostenko E.E. et al. *Scientific works of the National University of Food Technologies.* 2020. Vol. 26, №. 3. P.243–252. <http://dspace.nuft.edu.ua/jspui/handle/123456789/32155>

Opol N. I., Dobryanskaya E. V. *Nitrates.* Chisinau: Shtiintsa, 1986. 116 p.

Panasenko T.V., Krasnorutska K.I. The content of nitrate ions in food products of plant origin. *Current issues of biology, ecology and chemistry. Chemistry section.* 2016. Vol. 12, №. 2. P.103–112. http://nbuv.gov.ua/UJRN/apd_2016_12_2_13.

Panchenko T. I., Mandebura S. V. Estimation of nitrate content in products of plant origin.

[https://www.tnv-](https://www.tnv-agro.ksauniv.ks.ua/archives/101_2018/35.pdf)

[agro.ksauniv.ks.ua/archives/101_2018/35.pdf](https://www.tnv-agro.ksauniv.ks.ua/archives/101_2018/35.pdf)

Panasenko T. V. Nitrate ion content in plant foods. *Current issues in biology, ecology and chemistry. Chemistry section.* 2016. T. 12, № 2. P. 130–142. http://nbuv.gov.ua/UJRN/apd_2016_12_2_13

Santamaria P. A survey of nitrate and oxalate content in retail fresh vegetables, *J. Sci. Food Agr.* 1999. Vol. 79, P. 1882–1888. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0010\(199910\)79:13%3C1882::AIDJSFA450%3E3.0.CO;2-D](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0010(199910)79:13%3C1882::AIDJSFA450%3E3.0.CO;2-D).

Santamaria P. Nitrate in vegetables: toxicity, content, intake and EC regulation, *J. Sci. Food Agr.* 2006. Vol. 86, P. 10–17. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2351>.

Smolyar V. I., Tsyganenko O. I., Petrashenko G. I. Nitrates, nitrites and nitro-substitutes in food products and diets. URL: http://medved.kiev.ua/arh_nutr/art_2007/n07_3_5.htm.

The research of the amount of heavy metals and nitroso compounds in concentrated tomato products / Shutuyuk V. et al. *Food science and technology.* 2016. T.10, Vol. 3. P. 56–60.

Tsyganenko O.I. *Nitrates in food products.* K.: Zdorovye, 2005. C. 141–148.

Zhou Z.Y., Wang M. J., Wang J. S. Nitrate and nitrite contamination in vegetables in China, *Food Rev. Int.* 2000. Vol.16, P. 61–76. <https://doi.org/10.1081/FRI-100100282>.

DYNAMICS OF NITRATE ACCUMULATION IN TUBERS OF EARLY-RIPE POTATO VARIETIES DEPENDING ON FERTILIZATION SYSTEMS

Andrii DARMANSKYI, ORCID: 0009-0004-1363-9302. Roman ILCHUK, ORCID: 0000-0002-3524-4844

Institute of Agriculture of the Carpathian Region of the National Academy of Sciences of Ukraine

Due to the intensification of production components and the involvement of new elements of crop cultivation technology, the nitrate content in crop products and, accordingly, in the products produced, often exceeds the permissible maximum concentrations. Nitrates mainly enter the human body with vegetables, fruits and berries and account for about 70% of the daily dose, the rest comes with water and other products. The aim of the study was to determine the influence of the fertilization system and the size of the planting fraction on the adaptive properties and accumulation of nitrate content in tubers of early-ripening potato varieties in the conditions of the southern part of the Western Forest-Steppe of Ukraine. The article presents the results of a comprehensive assessment of early-ripening potato varieties Spas and Slauta for nitrate content and their content varied according to each individual variety and the proportion was from 68.4 to 109.5 mg/kg of fresh weight. The maximum nitrate content in the Spas potato variety was observed in the variant with the application of mineral fertilizers N90P90K120 + growth stimulator Nova-Marin + microfertilizer Nova-Macro and when planting tubers of 28-40 mm in size, it was 84.3 mg/kg on average over the three years of research, and when planting tubers of 40-60 mm in size, the highest indicator was in the variant with the application of N90P90K120 + growth stimulator Nova-Marin and was 75.7 mg/kg. In the Slauta variety, the highest indicators were observed with the application of mineral fertilizers N90P90K120 + growth stimulator Nova-Marin + microfertilizer Nova-Macro and planting tubers of both fractions and were 108.5 and 109.5 mg/kg of raw weight, respectively. A separate conclusion that follows from the results of the study is that in order to improve the quality of potatoes, it is possible to apply such factors as the correct choice of variety to meet the requirements for dry matter content and improved elements of growing technology

Keywords: potatoes, planting fraction size, nutrition, growth stimulant, microfertilizer, nitrates.

This is an open-access article under the terms of the Creative Commons

Отримано: 18.7.2026

Погоджено до друку: 31.7.2026

Опубліковано: 30.9.2026

АГРОТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ РЕАЛІЗАЦІЇ ПОТЕНЦІАЛУ ПРОДУКТИВНОСТІ ГІРЧИЦІ БІЛОЇ

Тарас МЕЛЬНИЧУК, кандидат сільськогосподарських наук, ORCID: 0000-0002-1235-0302
Володимир СЕНДЕЦЬКИЙ, доктор сільськогосподарських наук, ORCID: 0000-0003-2424-8206
Іванна КУРЛЯНОВА, ORCID: 0009-0008-1287-182X
Оксана СТЕЛЬМАХ, ORCID: 0000-0002-4097-6388

Прикарпатська державна сільськогосподарська дослідна станція
Інституту сільського господарства Карпатського регіону Національної академії аграрних наук України
вул. Степана Бандери, 21-А, м. Івано-Франківськ, 76014, Україна
e-mail: prykarpatskadsds@ukr.net

Проведеними дослідженнями впродовж 2021-2025 років обґрунтовано та рекомендовано виробництву агротехнологічні основи формування і реалізації потенціалу продуктивності гірчиці білої. За кількісно-біометричними показниками формування агроценозу із застосуванням визначальних елементів технології вирощування: строків сівби, норм висіву, розрахунково-балансового методу удобрення на програмовану урожайність отримано збільшення до контролю кількості стручків на рослині від 43 до 69 шт., ваги насіння з рослини з 1,11 до 1,56 г, маси 1000 насінин на 0,26-0,47 г, що забезпечило підвищення біологічного потенціалу продуктивності на 0,81 до 1,64 т/га або у 0,6-2,4 рази та приріст урожаю у варіантах використання мінерального та позакореневого удобрення відповідно на 0,47-1,49 т/га і 0,15-0,21 т/га; оптимального строку сівби до відтермінованих 7-14 днів на 0,23-0,56 т/га; за найбільш оптимальної норми висіву 2,0 млн сх. нас./га на 0,08-0,12 т/га до досліджуваних. Недоотримання урожаю від 0,17 до 0,36 т/га за норм висіву 2,0 і 1,5 млн сх. нас./га у варіантах програмованого застосування удобрення 2,5-3,0 т/га на фоні стабільної 0,8-1,2 т/га урожайності у контролі засвідчило про обмеження біологічного потенціалу продуктивності культури і наявних сортів. Частка впливу факторів на приріст урожаю в роки досліджень становила: удобрення 92-97% в тому числі позакореневе удобрення 2-4%; строків сівби від 55 до 98%, норм висіву від 2 до 38%. В структурі технологічних витрат на вирощування, які у порівнянні до контролю зростали у 2-4 рази вартість добрив становила 40-65% паливно-мастильних матеріалів 12-20%, пестицидів 5-8%, насіння 1-2% та оплати праці 10-12%. Отримані показники урожаю забезпечили збільшення умовно-чистого доходу за удобрення на 16-42%, із рівнем рентабельності 95-114%; за оптимального строку сівби відповідно на 25-55% за рентабельності 107%.

Ключові слова: гірчиця біла, удобрення, строки сівби, норми висіву, урожайність, економічна ефективність
Стаття з відкритим доступом на умовах ліцензії Creative Commons

Вступ

Вирощування нішевих малопоширених культур, зокрема гірчиці білої за обсягом у структурі посівних площ, прогнозованості внутрішньо-експортної затребуваності та економічної ефективності чи пріоритетності в ринкових умовах переважно перебуває на стихійно-орієнтованому рівні. Пріоритетними перевагами гірчиці білої за комплексом господарсько-цінних ознак є різносторонність використання в якості олійної, кормо-сидеральної культури як доброго попередника у сівозміні. Обсяги вирощування в останні роки становлять 30-50 тис. т за урожайності сортів 0,8-1,2 т/га, тому культура та реалізація її потенціалу для агровиробників залишається на рівні страхової або залежить від затребуваності ринку (Lykhochvor A. M., 2016; Zhuikov O. H., et al., 2014; Sluchak O. M., et al., 2021).

Надзвичайно актуальним питанням за існуючих викликів збереження родючості ґрунту, обмежених обсягів застосування органічних добрив, істотного зростання вартості мінеральних добрив для вітчизняних і закордонних виробників є вирощування гірчиці як пріоритетної в якості сидерального добрива за щорічної потреби насіння

8-15 тис. т на площу 0,5-1,0 млн га (Lykhochvor A. M., 2016; Zhuikov O. H., et al., 2014; Sluchak O. M., et al., 2021).

Аналіз напрацювань багатьох дослідників в напрямі вивчення технологічних заходів вирощування гірчиці білої з урахуванням особливостей біології культури та істотних змін агрокліматичних ресурсів агротехнологічними основами реалізації потенціалу продуктивності є обґрунтування базових елементів формування густоти рослин в агроценозі, строку сівби, системи живлення (Kozina T. V., 2012; Melnychuk T. V., et al., 2024; Melnyk T. I., et al., 2017).

Більшість авторів вважають, що гірчиця біла потребує раннього строку сівби. Найкращі умови для отримання дружніх сходів – прогрівання ґрунту до 8–10 °С. Цей період зазвичай збігається з терміном сівби ранніх колосових та зернобобових культур. Основними перевагами раннього строку висівання є невисокі плюсові температури та вологий шар ґрунту, які сприяють формуванню потужної кореневої системи та листової розетки, що підвищує конкурентоспроможність культури щодо бур'янів, сприяє зменшенню шкодочинності

шкідників (Kozina T. V., 2012; Melnyk T. I., et al., 2017).

Зважаючи що гірчиця біла – рослина довгого світлового дня, тому за пізнього терміну висіву вона швидше проходить усі фази росту та розвитку, що негативно позначається на врожайності. За пізніх строків сівби фази формування репродуктивних органів рослин припадають, як правило, на період жорстких засух та зростає загроза їх знищення шкідниками (Melnyk T. I., et al., 2017; Rozhkov A. O., et al., 2018).

Густота рослин за застосування норм висіву визначає площу живлення кожної рослини, характер розвитку кореневої системи, а також наземних органів, забезпеченість ґрунтовою вологою, інтенсивність освітлення та аерації й конкуренції до бур'янів. Ступінь використання внесених поживних речовин у великій мірі залежить від умов вологозабезпеченості густоти стеблостою. Таким чином, максимальна віддача від добрив досягається при певній густоті стояння рослин (Kozina T. V., 2012; Melnychuk T. V., et al., 2023).

Для гірчиці білої оптимальною є густота продуктивних рослин на 1 м² в межах 100–140 рослин. Виходячи з середньої маси 1000 насінин, способу сівби, схожості й господарської придатності насіння рекомендованими будуть такі норми висівання: при ширині міжрядь 12,5–15 см – 10–12 кг/га, 25–30 см – 7–9 кг/га (Zhuikov O. H., et al., 2014; Melnychuk T. V., et al., 2023).

Необґрунтоване підвищення норми висіву спричиняє біологічну конкуренцію рослин під час їх росту, розвитку та їх вилягання. На загущених посівах зменшується біологічний урожай рослин, спостерігається вища на 10–30 % ураженість шкідниками й хворобами (Kozina T. V., 2012; Melnychuk T. V., et al., 2023).

Загущеність посіву на 0,5 млн сх. нас./га (із початкових 1,0 млн сх. нас./га) обумовлювало зниження продуктивності рослин на 9,5–65,0 % відповідно. Чинні рекомендації норм висіву відрізняються та варіюють від 1,0–1,5 до 2,5–3,0 млн сх. нас./га, але доведено, що оптимальна норма висіву для отримання товарного насіння має забезпечувати на час збирання густоту стояння 125–140 шт./м² (Kozina T. V., 2012; Melnyk T. I., et al., 2017; Melnychuk T. V., et al., 2023).

Визначальними елементами підвищення реалізації біологічного потенціалу сортів гірчиці білої є обґрунтоване застосування мінерального удобрення. У деяких дослідженнях акцентовано увагу на ефективності використання мінерального удобрення в агроценозі гірчиці білої. В умовах Північно-східного Лісостепу на чорноземі типовому застосування доз добрив сприяло істотному підвищенню врожайності гірчиці білої порівняно з контролем, зокрема за норми N₃₀P₃₀K₃₀ – на 0,35 т/га; N₆₀P₆₀K₆₀ – на 0,56 т/га; N₉₀P₉₀K₉₀ – на 0,63 т/га (Agustini R. Y., 2018; Melnychuk T. V., et al., 2024; Shabbir H., 2015).

У переважній більшості досліджень авторами наголошено про потребу і ефективність застосування удобрення для підвищення продуктивності гірчиці білої, а також вказують на позитивну біологічну реакцію культури з істотним підвищенням рівня урожайності. Важливим аргументом впливу удобрення на урожайність культури в останні роки за істотного зростання цін на мінеральні добрива є встановлення оптимального рівня їх застосування та окупності, зважаючи на реалізацію біологічного потенціалу сорту та агроценозу (Melnychuk T. V., et al., 2024; Sendetskyi V. M., et al., 2024; Shakhid A., 2018).

На фоні обґрунтованих обставин необхідності вирощування гірчиці білої як дрібнонасінної з коротким періодом вегетації культури головними чинниками залишається розробка науково-обґрунтованих рекомендацій реалізації потенціалу продуктивності культури за впровадження технологічних елементів і оцінкою їх ефективності застосування біологічного, агрокліматичного, затратного ресурсу для зони культивування (Lykhochvor A. M., 2016; Sluchak O. M., et al., 2021).

Матеріали і методи

Експериментальні дослідження проводились впродовж 2021–2025 рр. на дослідному полі Прикарпатської державної сільськогосподарської дослідної станції Інституту сільського господарства Карпатського регіону НААН на дернових глибоких опідзолених глеюватих важко суглинкових ґрунтах. Агрохімічна характеристика: рН сольове – 5,7; сума ввібраних основ (Ca + Mg) – 16,2 ммоль/100 г (за Каппеном); вміст гумусу (за Тюрнімом) – 2,29 %; азоту, що легко гідролізується (за Корнфілдом) – 68; рухомого фосфору (за Кірсановим) – 53; рухомого калію (за Кірсановим) – 88 мг/кг ґрунту; рухомих форм мікроелементів: бору (за Бергером і Труогом) – 1,1; молібдену (за Грігом) – 0,2; марганцю (за Пейве і Рінькісом) – 2,7 мг/кг ґрунту.

Агротехніка загальноприйнята для ярих культур: попередник – озима пшениця, лущення стерні, зяблева оранка на глибину 22–25 см, ранньовесняна культивування для закриття вологи, передпосівний обробіток комбінованим агрегатом. Спосіб сівби – звичайно-рядковий з міжряддям 12,5 см.

Для забезпечення належного фітосанітарного стану агроценозу проводили післяпосівне застосування ґрунтового гербіциду Бутізан 400 к.с. з нормою 1,8 л/га та наступним використанням засобів захисту (інсектицидів, фунгіцидів) впродовж вегетації згідно з рекомендованими продуктами для захисту посівів від шкочинних об'єктів у всіх варіантах дослідів.

Для дослідів висіяно сорт гірчиці білої Підпечерецька селекції Прикарпатської ДСДС ІСТКР НААН. Розмір посівної ділянки – 56 м²,

облікової – 50 м², повторність – 4-кратна з систематичним розміщенням ділянок.

Дослід закладено за схемою: Фактор А - варіанти удобрення на програмований рівень урожаю культури з урахуванням умісту NPK в ґрунті, потреби мінеральних добрив на формування продуктивності за потенційним виносом основною і побічною продукціями та розрахунком, що на формування 1 т гірчиці білої необхідно - N₃₅₋₅₀P₁₅₋₂₀K₃₀₋₄₀, мезоеlementів Mg₅₋₆, S₈₋₁₀, Ca₄₋₆ коефіцієнти використання поживних речовин з ґрунту N - 0,4, P - 0,2, K - 0,5, мінеральних добрив N - 0,8, P - 0,6, K - 0,8.

У дослідженнях використовувались комплексні добрива імпортного походження Яра Міла N₁₂P₂₄K₁₂, азотних Яра Бела Сульфат N₂₄S₁₅: A₁ - без добрив (контроль N₂₀P₁₅K₅₀ - ґрунт); A₂ - N₇₀P₃₀K₅₀ (A₁ + N₁₅P₃₀K₁₅ + N₄₀); A₃ - N₉₀P₄₀K₇₀ (A₁ + N₂₄P₄₈K₂₄ + N₇₀); A₄ - N₁₁₀P₅₀K₉₀ (A₁ + N₃₀P₆₀K₃₀ + N₈₀); A₅ - N₁₃₀P₆₀K₁₁₀ (A₁ + N₄₀P₈₀K₄₀ + N₉₀); позакореневе удобрення Яра Віта - Бортрак 150, Брасітрел Про (1,5 + 1,5 л/га) для забезпечення потреби бором та іншими макро- мікроелементами.

Фактор В – норма висіву, млн. сх. нас./га: B₁ – 2,0; B₂ – 1,5; B₃ – 1,0.

Дослід з вивчення строків сівби закладено: перший (оптимальний) за досягнення фізичної стиглості ґрунту і його температурного режиму прогрівання 5–10 °С; наступні строки через 7–14 днів до оптимального. Варіант удобрення N₉₀P₄₀K₇₀ на програмований рівень урожаю культури 2,0–2,5 т/га.

Комплексні добрива і 85% азотних добрив вносили в передпосівну культивування та під час сівби сівалкою, 15% азотних - у фазі BBCH - 15 – 20. Позакореневе підживлення здійснювали у фазі BBCH 50 – 60.

В усіх варіантах дослідів проводились фенологічні спостереження за ростом і розвитком рослин методом встановлення облікових площадок та структурного аналізу формування кількісно біолого-морфологічних ознак репродуктивних органів рослин згідно з методикою проведення експертизи сортів гірчиці білої (*Sinapis alba* L.)

Оцінку фітосанітарного стану посівів згідно «Методики випробування і застосування пестицидів» (Trybel S. O., et al., 2001).

Обліки рівня урожаю проводили шляхом обмолоту з кожної ділянки та зважування і перерахунку на стандартну вологість і 100 % чистоту згідно з ДСТУ 2240-93, а для встановлення біологічного рівня урожаю методом відбору пробних снопів для обмолоту і структурного аналізу рослин з двох несуміжних повторень. Масу 1000 насінин визначали за ДСТУ 4138-2002.

Економічну ефективність досліджуваних елементів технології розраховано згідно (Tarariko Yu. O., et al., 2001). Статистична обробка дослідних даних проводилась методом статистичного аналізу (Ushkarenko V. O., et al., 2013).

Результати та обговорення

В технології вирощування гірчиці білої як культури короткого періоду вегетації 90–110 днів визначальними основами формування та реалізації потенціалу продуктивності агроценозу з урахуванням її біологічних особливостей і сорту є обґрунтування та ефективне застосування базових елементів: строків сівби, норми висіву, системи живлення рослин на фоні забезпечення належного їх захисту від шкодо чинних об'єктів (бур'янів, шкідників і хвороб) впродовж вегетації особливо в сучасних умовах зміни кліматичних факторів.

Впродовж 2021–2025 рр. погодні умови до середньобаторічних показників були різними навіть аномальними, що створювало негативні передумови для реалізації біологічного потенціалу продуктивності культури та особливості на встановлення впливу досліджуваних елементів.

Найбільш характерними та сприятливими за кількістю опадів температурного режиму зони вирощування до середньобаторічних показників були 2021 і 2024 роки, що забезпечило найвищий рівень формування урожайності з встановленням істотного впливу досліджуваних факторів.

У 2022 р. кількість опадів у період до часу сівби становила 42 %, за вегетаційний період – 55 % до середньобаторічних показників та у 2025 році впродовж 40–45 днів за відсутності опадів в критичні періоди вегетації, що створювало низький рівень вологозабезпеченості й нівелювало вплив внесених добрив через недостатню їх розчинність і доступність для рослин та впливало на формування продуктивності агроценозу.

Формування агроценозу гірчиці білої у 2023 р. відбувалося за кількості опадів на 30–46 % більше і низькотемпературних показників повітря на 25–30 % менше до середньобаторічних, що створило передумови для критичних параметрів щільності та аерації ґрунту, зниження польової схожості на 19–29 %, зменшення на 7–13 % густоти рослин до отриманих сходів та зменшення на 0,63–1,12 т/га програмованого рівня урожайності.

За таких погодних умов як неконтрольованого фактору настання оптимального строку сівби гірчиці білої із досягненням фізичної стиглості ґрунту його прогрівання від 5 до 10 °С в роки досліджень було в терміни від 6 квітня у 2021–2024 рр. до 22 квітня у 2023 році з відповідним відтермінуванням досліджуваних строків на 7–14 днів.

Формування густоти рослин в агроценозі переважно залежало від норми висіву, що на період сходів становила від 89 до 174 шт/м² за польової схожості від 85 до 91% з тенденцією підвищення із зменшенням норми висіву та інтенсивності застосування доз удобрення (табл.1).

Таблиця 1. Вплив елементів технології вирощування на структурні показники формування потенціалу продуктивності гірчиці білої (середнє 2021-2025 рр.)

продуктивності при підсоломі (середнє 2021-2023 рр.)						
№ з/п	Норма висіву млн. сх. нас./га Фактор В	Удобрення на програмовану урожайність та строки сівби, т/га Фактор А				
		A ₁ -0,8-1,2 контроль без добрив	A ₂ -2,0	N ₉₀ P ₄₀ K ₇₀ (строки сівби)		A ₃ -3,0 N ₁₃₀ P ₆₀ K ₁₁₀
			06.04-22.04	13.04-29.04	20.04-10.05	
1	B ₁ -2,0	173/86	172/87	169/86	167/84	174/87
	B ₂ -1,5	127/85	134/89	132/88	130/87	132/88
	B ₃ -1,0	89/89	91/91	-	-	93/93
2	B ₁ -2,0	153/87	153/89	150/89	150/90	159/91
	B ₂ -1,5	112/88	128/96	118/89	115/88	125/95
	B ₃ -1,0	79/89	84/92	-	-	86/93
3	B ₁ -2,0	70,5/32,7	113,4/41,9	84,8/33,3	68,6/25,5	139,4/43,2
	B ₂ -1,5	80,4/35,3	127,5/42,7	100,7/37,0	81,1/33,1	154,6/47,0
	B ₃ -1,0	97,6/38,4	143,7/45,4	-	-	165,6/53,3
4	B ₁ -2,0	0,95/5,68	1,50/5,89	1,38/5,90	1,31/5,64	2,06/6,15
	B ₂ -1,5	1,24/5,76	1,68/5,97	1,44/5,96	1,39/5,77	2,65/6,23
	B ₃ -1,0	1,66/5,83	2,48/6,07	-	-	3,22/6,29
5	B ₁ -2,0	1,45	2,36	2,07	1,62	3,14
	B ₂ -1,5	1,41	2,25	2,02	1,60	3,04
	B ₃ -1,0	1,31	2,12	-	-	2,81
6	B ₁ - B ₃	106	108	100	95	109

Примітки. 1 – кількість рослин на період сходів шт/м²/‰ до норми висівного насіння; 2 – кількість рослин на час збирання шт/м²/‰ до отриманих сходів; 3 – кількість стручків на рослині / на центральному пагоні, шт.; 4 – вага насіння з 1 рослини / маса 1000 насінин, г; 5 – біологічний потенціал урожайності, т/га; 6 – період вегетації культури, дні.

На період збирання урожаю густота рослин до отриманих сходів зменшилася на 7-13% за аналогічною тенденцією та впливу внутрішньовидової конкуренції рослин за виживання в агроценозі.

За кількісно-біометричними показниками із зменшенням норми висіву та підвищенням доз удобрення кількість стручків на рослині, вага насіння з рослини, маса 1000 насінин зростала відповідно на 38-70%, 74- 92%, 3-11%, а до контролю без добрив у середньому на 8 до 94%.

Проведення сівби з нормою 1,0 млн сх. нас./га забезпечило вищі показники структурних елементів потенціалу продуктивності, але визначальним фактором формування урожаю була густота рослин на період збирання урожаю.

Найвищі показники біологічного потенціалу урожайності отримано за норми висіву 2,0 млн сх. нас./га та застосування підвищених доз удобрення від 2,36 до 3,14 т/га із збільшенням до контролю на 0,91-1,69 т/га або у 0,6-2,4 рази.

За структурними показниками та формування біологічного потенціалу урожайності отримано зниження на 0,29-0,74 т/га із відтермінування строків сівби до оптимального 7-14 днів.

Впродовж дослідження період вегетації гірчиці білої за оптимального строку сівби становив 106-109 днів з тенденцією збільшення на 2-4 дні з підвищенням доз удобрення та зменшенням на 8-14 днів, а також скороченням термінів міжфазних періодів розвитку рослин за відтермінування строку сівби що істотно впливало на формування продуктивності агроценозу.

Урожайність гірчиці білої з врахуванням природних втрат і за період збирання, просушування

та очищення до параметрів ДСТУ-2240-93 в середньому у роки досліджень становила 1,01–2,62 т/га відповідно закономірностей і тенденцій впливу строку сівби, норм висіву, доз удобрення на формування біологічного потенціалу продуктивності (табл. 2).

За роки досліджень: Нір₀₅ т/га А – удобрення – від 0,02 до 0,24; В – норми висіву від 0,02 до 0,13; % впливу факторів: А – від 92 до 97, В – від 2,3 до 3,7;

Нір₀₅ т/га: А - строк сівби від 0,03 до 0,21; В – норми висіву від 0,02 до 0,11; % впливу факторів: А – від 55 до 98; В – від 0,8 до 38.

Результатами досліджень встановлено приріст урожайності за застосування доз удобрення на програмований рівень на 0,47-1,49 т/га за норм висіву 2,0 і 1,5 млн сх. нас./га із зменшенням на 0,15-0,25 т/га за норми висіву 1,0 млн сх. нас./га. Застосування позакореневого удобрення на фоні доз основного удобрення забезпечили приріст урожайності в роки досліджень від 0,15 до 0,21 т/га або на 13-17%.

У досліді з вивчення строків сівби встановлено зниження на 0,23-0,56 т/га або на 12 і 28% врожайності за відтермінування термінів до оптимального. Частка впливу досліджуваних факторів в роки дослідження на приріст урожайності, зокрема застосування удобрення від 92 до 97%, в тому числі позакореневого удобрення 2-4%, строків сівби від 55 до 98%, норм висіву від 2 до 38%. Недоотримання урожаю від 0,17 до 0,36 т/га за норм висіву 2,0 і 1,5 млн сх. нас./га у варіантах програмованого застосування удобрення 2,5-3,0 т/га на фоні стабільної 0,8-1,2 т/га урожайності у контролі засвідчило про обмеження біологічного потенціалу продуктивності культури і наявного сортового складу. За такого обґрунтування

особливо актуальним є створення сортів чи гібридів гірчиці білої інтенсивного типу для реалізації потенціалу їх продуктивності за рахунок

інтенсифікації технології вирощування, що підтвердилося аналізом економічної ефективності культивування.

Таблиця 2. Урожайність гірчиці білої за застосування елементів технології вирощування, т/га (середнє 2021-2025 рр.)

№ з/п				Удобрення та строки сівби на програмовану урожайність, т/га Фактор А			Норма висіву млн. сх. нас./га Фактор В								
							B ₁ - 2,0	B ₂ - 1,5	B ₃ - 1,0						
1				A ₁ -0,8-1,2 контроль (без добрив)			<u>1,08</u> -	<u>1,14</u> -	<u>1,01</u> -						
2				A ₁ + позакореневе удобрення			<u>1,23</u> 0,15	<u>1,28</u> 0,14	<u>1,16</u> 0,15						
3				A ₂ - N ₇₀ P ₃₀ K ₅₀ – 1,5 т/га			<u>1,63</u> 0,55	<u>1,63</u> 0,49	<u>1,48</u> 0,47						
4				A ₃ - N ₉₀ P ₄₀ K ₇₀ – 2,0 т/га			Строки сівби			06.04-22.04			<u>1,98</u> 0,90	<u>1,95</u> 0,81	<u>1,79</u> 0,78
										13.04-29.04			<u>1,72</u> -0,26	<u>1,72</u> -0,23	-
										20.04-10.05			<u>1,42</u> -0,56	<u>1,43</u> -0,52	-
5				A ₄ - N ₁₁₀ P ₅₀ K ₉₀ -2,5 т/га			<u>2,37</u> 1,24	<u>2,33</u> 1,19	<u>2,12</u> 1,11						
6				A ₅ - N ₁₃₀ P ₆₀ K ₁₁₀ -3,0 т/га			<u>2,62</u> 1,49	<u>2,60</u> 1,46	<u>2,39</u> 1,38						

Примітка: в знаменнику: ± удобрєння до контролю; строки сїви до оптимального, т/га.

Економічні показники ефективності застосування елементів технології перебували у прямій залежності від рівня продуктивності культури,

сформованої ціни товарної продукції та задіяного ресурсного потенціалу, для вирощування (табл. 3).

Таблиця 3. Економічні показники ефективності застосування елементів технології вирощування гірчиці білої (середнє 2021-2025 рр.)

№ з/п	Удобрєння та строки сїви на програмовану урожайність, т/га			Показники					
				1	2	3	4	5	6
1	А ₁ -0,8-1,2 контроль (без добрив)			1,08	9,98	9,24	32,40	22,42	225
2	А ₁ + позакорєнєве удобрєння			1,23	10,92	8,98	36,90	25,98	237
3	А ₂ - N ₇₀ P ₃₀ K ₅₀ – 1,5 т/га			1,63	22,83	14,00	48,90	26,07	114
4	А ₃ - N ₉₀ P ₄₀ K ₇₀ – 2,0 т/га	Строки сїви	06.04-22.04	1,98	28,63	14,61	58,80	30,77	107
			13.04-29.04	1,72	28,63	16,65	51,60	22,97	80
			20.04-10.05	1,42	28,63	20,16	42,60	13,97	49
5	А ₄ - N ₁₁₀ P ₅₀ K ₉₀ -2,5 т/га			2,37	34,72	14,65	71,10	36,38	105
6	А ₅ - N ₁₃₀ P ₆₀ K ₁₁₀ -3,0 т/га			2,62	40,28	15,37	78,60	38,32	95

Примітка: розрахунки економічної ефективності за норми висїву 2,0 млн сх. нас/га; ціна товарної продукції 30 грн/кг; 1 - урожайність, т/га; 2 – витрати на вирощування, тис. грн/га; 3 – собівартість тис. грн/т; 4 – виручка від продукції, тис. грн; 5 - умовно-чистий дохід, тис. грн/га; 6 – рентабельність, %.

В структурі технологічних витрат на вирощування у 2021-2025 рр., які у порівнянні до контролю зростали у 2-4 рази вартість добрив становила 40-65% паливно-мастильних матеріалів 12-20%, пестицидів 5-8%, насіння 1-2% та оплати праці 10-12%.

У досліді з вивчення строків сїви за однакових витрат 28,6 тис. грн/га найбільш економічно ефективним впродовж 2021-2025 рр. була сїва за оптимального терміну з нормою висїву 2,0 млн сх. нас./га, що забезпечило зниження собівартості на 2,0-5,5 тис. грн/т та збільшення умовно-чистого доходу на 2,7-16,2 тис. грн/га і рівня рентабельності на 27-58% в порівнянні до відтермінованих на 7-14 днів.

Застосування удобрєння на програмований рівень урожайності навіть за зростання витрат на вирощування у 2-4 рази та відповідно зниження у 1,8-2,2 рази рівня рентабельності до контролю, що є дискусійним показником при збільшенні умовно-чистого доходу на 4-16 тис. грн/га і їх післядію на наступні культури сївозміни.

За існуючих обставин цінової політики на ресурси, товарну продукцію та з метою підвищення економічної ефективності рекомендовано використання високих доз удобрєння для вирощування високорепродукційного насіння гірчиці білої за ціною у 2-3 рази вищої. Надзвичайно актуальним ресурсом у підвищенні ефективності

вироснування повинно стати створення нових високоінтенсивних сортів, як біологічного ресурсу, що дозволить підвищити рівень реалізації потенціалу

Висновки

Оптимально рекомендованим строком сівби гірчиці білої є терміни досягнення фізичної стиглості ґрунту і його прогрівання 5-10 °С, який переважно співпадає із терміном завершення сівби ярих зернових і зернобобових культур та за результатами досліджень впродовж 2021-2025 р. забезпечив найвищі показники урожайності 1,98 т/га з перевищенням на 0,26-0,56 т/га або 15-29% наступні строки за зниження собівартості продукції на 2,04 і 5,6 тис. грн/т; збільшення умовно чистого доходу на 7,8 і 16,8 тис. грн/га; рентабельності на 27-58%.

Найбільш оптимальною і рекомендованою виробництву встановлено норму висіву 2,0 млн сх. нас./га що забезпечило у різних варіантах застосування удобрення, строків сівби густоту рослин на період збирання урожаю 153-159 шт./м² за перевищення рівня біологічного потенціалу на 0,04-0,33 т/га, приріст урожайності на 0,02-0,25 т/га до досліджуваних 1,5 і 1,0 млн сх. нас./га з часткою впливу фактору 55-98%.

Результатами досліджень встановлено, що застосування удобрення на програмовану урожайність забезпечили її приріст до контролю від 0,49 до 1,49 т/га або у 0,6-2,4 рази за рахунок збільшення кількості стручків на рослині, ваги насіння з рослини, маси 1000 насінин відповідно на 38-70%; 74-92%; 3-11% за найефективніших варіантів N₉₀P₄₀K₇₀ і N₁₁₀P₅₀K₉₀ з часткою впливу фактору 92-97%.

Застосування позакореневого удобрення до контролю і на фоні мінерального забезпечило приріст урожаю 0,15-0,21 т/га або на 10-15% за частки впливу

Список використаної літератури

Agustini R. Y. Effect on Growth and Yield of Mustard (*Brassica juncea*) to Addition of Coal Bottom Ash and Organic Matter. AGROSAINSTEK : Jurnal Ilmu dan Teknologi Pertanian. 2018. Vol. 2. No. 1. P. 40–43. DOI: <https://doi.org/10.33019/agrosainstek.v2i1.17>.

Comprehensive agrobiological assessment of the modern varietal composition of white mustard under the conditions of the Dry Steppe / O. H. Zhuykov et al. Zroshuvane zemlerobstvo : Zb. nauk. pr., Kherson : Hrin D. S., 2012. Issue 58. P. 94–99.

Economic assessment of farming systems and crop cultivation technology / Yu. O. Tarariko et al. Kyiv : Nara-Print. 2001. 380 p.

Kozina T. V. The growth and development of plants and the productivity of white mustard depending on the timing of sowing and the rate of sowing in the conditions of the Western Forest-Steppe. Zb. nauk. pr. Bilotserkivskoho NAU : Ahrobiolohiia. Bila Tserkva, 2012. Issue 7 (91).

Kozina T. V. The influence of the growth regulator “Vermibiomag” on sowing dates and sowing rates on the seed productivity of white mustard in the conditions of the Western Forest-Steppe. Zbirnyk Podilskoho derzhavnoho

продуктивності культури за ефективного застосування рекомендованих елементів технології і вагоме позиціонування культури в агровиробництві.

фактору 2-4% було найбільш ефективним агрозаходом особливо в критичні періоди вегетації культури для зниження негативного впливу кліматичних факторів та за економічними показниками.

За економічними показниками застосування досліджуваних елементів технології вирощування найбільш ефективними були сівба в оптимальні строки, застосування удобрення на програмовану урожайність 2,0-2,5 т/га, які навіть за збільшення витрат на вирощування у 2-4 рази до контролю з часткою 40-65% вартості добрив відповідно зменшення рівня рентабельності у 1,8-2,2 рази забезпечувало отримання умовно-чистого доходу 30,8-36,4 тис. грн/га або більше на 37-62%.

За сформованих цін на добрива, товарну продукцію з метою підвищення економічної ефективності рекомендуємо застосовувати підвищені дози удобрення для вирощування високорепродукційне насіння за ціною у 2-3 рази вищою, а також дозволяє оптимізувати застосування добрив під наступні культури сівозміни з врахуванням їх післядії.

Проведені і узагальнені нами результати багатьох досліджень засвідчили, що біологічний потенціал продуктивності культури та наявного сортового складу знаходиться на рівні 2,5-3,0 т/га і ефективним ресурсом його підвищення окрім технологічних агрозаходів може стати біологічний фактор за створення високоінтенсивних сортів чи гібридів гірчиці білої.

aharno-tekhnichnoho universytetu. 2014. Issue 22. P. 77–81.

Lykhochvor A. M. The yield of spring oil crops, the quality of their oil, the economic efficiency of cultivation in the conditions of the Western Forest-Steppe. Sword zhurnal. Nauchnyi vzhliad v budushchee. Odessa : Kupryenko S. V., 2016. Issue 4. Vol. 9. P. 31–37.

Melnichuk T., Matviets V., Sendetskyi V., Rudavska N. Formation of productivity of white mustard with programmed application of mineral and foliar fertilizers. Bulletin of Agricultural Science. T. 102. No 5 . 2024. P. 24-30. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202405-03>

Melnik T. I., Ali Shakhid, Kolosok V. H. The quality of white mustard seeds depending on the variety and sowing rates in the conditions of the northeastern forest-steppe of Ukraine. Tavriyskiy naukovyi visnyk. 2017. No. 113. P. 92–97.

Methodology of testing and application of pesticides / S. O. Trybel et al. Kyiv : Svit. 2001. 448 p.

Methodology for examination of varieties of white mustard (*Sinapis alba* L.) for distinctiveness, homogeneity and stability. Methodology of examination of plant varieties of the oleaginous group for distinction,

homogeneity and stability / Ministry of Economic Development, Trade and Agriculture of Ukraine. Ukrainian Institute of Expertise of Plant Varieties. [Effective from 2020-10-27, No. 2162-20]. 169 p.

Mustard in the Southern Steppe: agroecological aspects and growing technologies : scientific monograph / O. H. Zhuikov et al. Kherson : Hrin D. S., 2014. 416 p.

Productivity of white mustard under the programmed application of fertilizers and sowing rates in the conditions of Precarpathia / T. V. Melnychuk et al. *Tavriiskyi naukovi visnyk*. 2023. No. 134. P. 88-97.

Response of Indian mustard to Nutrients and Plant Growth Regulators: The Influence on Yield, Available Soil P Balance and P Recycling through Residues / R. K. Dubey et al. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. ISSN: 23197706. Vol. 6. No. 8 (2017). P. 3319–3331.

Sendetskyi V.M., Melnychuk T.V., Lozovyi O.A. Economic efficiency of application of elements technologies of growing white mustard in the conditions of the Carpatia *Tavriiskyi naukovi visnyk*. No. 139. T.2. 2024. P.56-65. <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2024.139.2.8>

Shabbir H. The productivity of oil crops of the Brassicaceae family depending on the use of fertilizers in the conditions of the North-Eastern Forest-Steppe of Ukraine : avtoref. dys. na zdobuttia nauk. stupenia kand. s.-h. nauk : 06.01.09 «Roslynnystvo». Sumy, 2021. 22 p.

Shakhid A. The influence of mineral fertilizer rates on the growth and development of white mustard plants in the conditions of the northeastern Forest-Steppe of

Ukraine. *Tavriiskyi naukovi visnyk «Zemlerobstvo, roslynnystvo, ovochivnystvo ta bashtannystvo»*. 2018. No. 101. P. 141–145.

Statistical analysis of the results of field experiments in agriculture / V. O. Ushkarenko et al. Kherson : Ailant. 2013. 378 p.

The current state of white mustard production and its national economic significance / O. M. Sluchak et al. *Peredhime ta hirske zemlerobstvo i tvarynnystvo*. 2021. Issue 70 (2). P. 49–59.

The effect of sulphur fertilization on macronutrient concentrations in the post-harvest biomass of mustard / S. Krzbiec et al. *Plant Soil Environ*. 2015, No. 6. P. 266–272.

The influence of weather and climate parameters on the quality of seeds of different types of mustard in the conditions of the North-Eastern Forest-Steppe of Ukraine / T. I. Melnyk et al. *Visnyk Sumskoho natsionalnoho aharnoho universytetu*. Sumy, 2018. No. 3. P. 53–57.

Yield and sowing qualities of white mustard depending on the treatment of seeds with physiologically active drugs. A. O. Rozhkov et al. *Selektsiya i nasinnystvo*. 2018. Issue 113. P. 208–217. DOI: <https://doi.org/10.30835/2413-7510.2018.134381>.

Zhuikov O. H. Biometric indicators, economically valuable traits and the level of seed productivity of white mustard depending on the method of sowing and the rate of sowing in the conditions of southern Ukraine. *Tavriiskyi naukovi visnyk*. Issue 81. Kherson : Hrin D. S. 2012. P. 51–58.

AGROTECHNOLOGICAL BASES FOR REALIZING THE PRODUCTIVITY POTENTIAL OF WHITE MUSTARD

Taras MELNYCHUK, ORCID: 0000-0002-1235-0302, Volodymyr SENDETSKYI, ORCID: 0000-0003-2424-8206
Ivanna KURLYANOVA ORCID: 0009-0008-1287-182X, Oksana STELMAKH, ORCID: 0000-0002-4097-6388

Precarpathian State Agricultural Experimental Station
of the Institute of Agriculture of the Carpathian Region of the NAAS

Research conducted during 2021–2025 has substantiated and recommended to the industry the agrotechnological foundations for developing and realizing the productivity potential of white mustard. Based on quantitative and biometric indicators of agrocenosis formation using key elements of cultivation technology—sowing dates, seeding rates, and the calculated-balance method of fertilization – the following increases were achieved compared to the control: the number of pods per plant rose from 43 to 69, seed weight per plant from 1.11 to 1.56 g, and the weight of 1,000 seeds by 0.26–0.47 g, which resulted in an increase in biological yield potential from 0.81 to 1.64 t/ha, or by 0.6–2.2 times, and a yield increase in the variants using mineral and foliar fertilizers by 0.47–1.49 t/ha and 0.14–0.15 t/ha, respectively; from the optimal sowing date to a delayed sowing date of 7–14 days by 0.23–0.56 t/ha; at the most optimal seeding rate of 2.0 million seeds/ha by 0.08–0.12 t/ha compared to the control. Yield losses ranging from 0.17 to 0.36 t/ha at seeding rates of 2.0 and 1.5 million seeds/ha in the variants with programmed fertilizer application of 2.5–3.0 t/ha, against a stable yield of 0.8–1.2 t/ha in the control, indicated limitations in the biological productivity potential of the crop and the available varieties. The relative contribution of factors to yield increase during the study years was as follows: fertilizers 92–97%, including foliar fertilizers 2–4%; sowing dates 55–98%; and seeding rates 2–38%. In the structure of production costs, which increased 2–4 times compared to the control, the cost of fertilizers accounted for 40–65%, fuel and lubricants 12–20%, pesticides 5–8%, seeds 1–2%, and labor costs 10–12%. The obtained yield indicators ensured an increase in net income from fertilization by 16–42%, with a profitability level of 95–114%; for the optimal sowing date, the increase was 25–55% with a profitability of 107%.

Keywords: white mustard, fertilization, sowing dates, seeding rates, yield, economic efficiency.

This is an open-access article under the terms of the Creative Commons

Отримано: 21.4.2026

Погоджено до друку: 20.6.2026

Опубліковано: 30.9.2026

© О. І. Присяжнюк, Н. О. Кононюк, Т. В. Шевченко, 2026
УДК 633.11“324”:581.132:631.816

DOI: 10.32636/agroscience.2026-(5)-3-8

ЗАКОНОМІРНОСТІ ФОТОСИНТЕТИЧНОЇ АКТИВНОСТІ ПШЕНИЦІ ОЗИМОЇ ПІД ВПЛИВОМ МІНЕРАЛЬНОГО УДОБРЕННЯ ТА ЕЛЕМЕНТІВ БІОЛОГІЗАЦІЇ

Олег ПРИСЯЖНЮК¹, доктор сільськогосподарських наук, ORCID: 0000-0002-4639-424X

Надія КОНОНЮК¹, кандидат сільськогосподарських наук, ORCID: 0000-0002-5313-4999

Тамара ШЕВЧЕНКО², кандидат сільськогосподарських наук, ORCID: 0000-0001-9488-0325

¹Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН, вул. Клінічна, 25, м. Київ, 03110, Україна

²Національна академія аграрних наук України, вул. Омеляновича-Павленко, 9, м. Київ, 01010
e-mail: ollpris@gmail.com

Представлено результати п'ятирічних досліджень (2020–2024 рр.) активності фотосинтезу пшениці озимої (*Triticum aestivum* L.) залежно від рівня мінерального удобрення на чорноземі типовому малогумусному середньосуглинковому, від сортових особливостей, від застосування ретардантів та системи захисту рослин в умовах Правобережного Лісостепу України. Повний факторіальний експеримент включав 36 варіантів: три сорти (Легенда білоцерківська, Манера одеська, Воздвиженка), три рівні удобрення (N60P40K40, N120P60K60, N180P90K90+мікроелементи), дві системи захисту (хімічна та біологічна на основі ТАЕГРО) і два ретарданти (Квантум-Аквасил та МОДДУС 250 ЕС). Встановлено, що рівень мінерального удобрення найсильніше впливає на площу листової поверхні (ПЛП) та фотосинтетичний потенціал (ФП), забезпечуючи приріст +35 та +37 % відповідно при мінімальному впливі на чисту продуктивність фотосинтезу (ЧПФ, +1,3 %). Визначено два шляхи підвищення фотосинтетичної продуктивності: екстенсивний (удобрення – через збільшення ПЛП і ФП) та інтенсивний (сорт, ретарданти – через підвищення ЧПФ). Максимальна ПЛП досягала 41,0±3,8 тис. м²/га у фазі колосіння. Сорт Воздвиженка характеризувався найвищою ЧПФ (5,32 г/м²·добу), Легенда білоцерківська – найвищим ФП (3,18 млн м²·діб/га). МОДДУС 250 ЕС підвищував ЧПФ на 3,6 % попри зменшення ПЛП на 5 %.

Ключові слова: площа листової поверхні, хлорофіли, фотосинтетичний потенціал, чиста продуктивність фотосинтезу, мінеральне удобрення, сорт
Стаття з відкритим доступом на умовах ліцензії Creative Commons

Вступ

Фотосинтетична діяльність посівів є ключовим фактором формування біологічної продуктивності зернових культур. Ефективність трансформації сонячної енергії в органічну речовину визначає потенційну врожайність культури та можливості її реалізації (Petrychenko V. F., Lykhochvor V. V., 2020). За даними Zhu X. G., Long S. P., Ort D. R. (2010), теоретичний максимум ефективності перетворення сонячної радіації у біомасу C₃-рослин становить 4,6 %, тоді як реальні посіви пшениці реалізують лише 1,0–1,5 %, що свідчить про значний потенціал оптимізації фотосинтетичних процесів.

Комплексна оцінка фотосинтетичної діяльності включає аналіз площі листової поверхні (ПЛП), вмісту хлорофілів, фотосинтетичного потенціалу (ФП) та чистої продуктивності фотосинтезу (ЧПФ). За результатами досліджень Parry M. A. J., Reynolds M. P., Salvucci M. E. et al. (2011), підвищення ефективності фотосинтезу на 10–15 % може забезпечити приріст урожайності зернових на 20–30 %. Shvartau et al. (2018) встановили, що оптимізація мінерального живлення збільшує ФП посівів пшениці озимої на 30–40 % при значно меншому впливі на ЧПФ, що вказує на переважно екстенсивний характер реалізації продуктивності.

Рівень мінерального живлення суттєво впливає на параметри фотосинтетичного апарату. За даними Hospodarenko H. M. (2016), оптимізація

азотного удобрення забезпечує збільшення ПЛП пшениці озимої на 25–40 % та підвищення вмісту хлорофілів на 15–20 %. Evans J. R. (2013) показав, що до 75 % листового азоту зосереджено у хлоропластах, переважно у складі Рубіско та білків тилакоїдних мембран, що пояснює тісний зв'язок між азотним живленням та інтенсивністю фотосинтезу. Morhun V. V., Sanin Ye. Yu., Shvartau V. V. (2014) у межах програми «Клуб 100 центнерів» продемонстрували, що за збалансованого мінерального живлення ФП посівів досягав 3,5–4,0 млн м²·діб/га, що забезпечувало урожайність понад 10 т/га.

Генотипові відмінності у фотосинтетичній діяльності є важливим резервом підвищення продуктивності. Driever S. M., Lawson T., Andralojc P. J. et al. (2014) виявили суттєву генетичну варіабельність ЧПФ серед сортів пшениці (4,2–6,8 г/м²·добу), що дозволяє проводити селекцію на підвищену фотосинтетичну ефективність. Dubytska A., Kachmar O., Dubytskyi O. (2023) встановили, що за біологізованих систем удобрення ПЛП пшениці озимої в Карпатському регіоні становила 35–42 тис. м²/га, а врожайність – 4,6–5,5 т/га.

Застосування ретардантів модифікує архітектуру рослин та впливає на фотосинтетичну діяльність. Rademacher W. (2015) показав, що інгібітори біосинтезу гіберелінів (тринексапак-етил) зменшують висоту рослин на 10–20 % з одночасним

підвищенням вмісту хлорофілів на 5–8 % та покращенням світлового режиму посіву.

Незважаючи на значну кількість досліджень з окремих аспектів фотосинтетичної діяльності, комплексна оцінка впливу системи факторів (удобрення, сорт, ретардант, система захисту) на динаміку ПЛП, вміст хлорофілів, ФП та ЧПФ в рамках єдиного факторіального експерименту залишається недостатньо висвітленою (Rudavska N., Behen L., Hrecheshniuk O., 2025). Метою дослідження було встановлення закономірностей фотосинтетичної діяльності посівів пшениці озимої залежно від комплексу агротехнічних факторів в умовах Правобережного Лісостепу України.

Матеріали і методи

Дослідження проводили впродовж 2020–2024 рр. на дослідному полі Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН (Правобережний Лісостеп, Київська обл.). Ґрунт – чорнозем типовий малогумусний середньосуглинковий з вмістом гумусу 4,1–4,3 %, рухомого фосфору (за Чириковим) – 128–145 мг/кг, обмінного калію – 112–130 мг/кг, $pH_{\text{con.}}$ – 5,8–6,2.

Вегетаційний період 2020 р. характеризувався контрастними умовами: значне похолодання у травні (коефіцієнт суттєвості –2,12) на фоні підвищеної вологості (+1,54) створювало несприятливі умови для розвитку посівів у фазі кушіння – трубкування. Натомість червень був аномально спекотним (+2,67), що прискорювало проходження фаз колосіння – цвітіння. Липень і серпень за температурним режимом та кількістю опадів були близькими до норми, що забезпечило задовільні умови для наливу зерна. Загалом рік оцінюється як задовільний для формування врожаю, з компенсацією весняного стресу помірними літніми умовами.

Вегетаційний період 2021 р. відзначався помірним весняним розвитком за температурних умов, близьких до норми (квітень +0,21; травень +0,09). Критичний період настав влітку: червень був теплим (+1,64) за дефіциту опадів (–1,67), а липень — спекотним (+2,29) з продовженням посушливих умов (–1,17). Поєднання підвищених температур із дефіцитом вологи у період колосіння – цвітіння – наливу зерна обмежувало тривалість активного фотосинтезу та прискорювало старіння листового апарату. Рік характеризувався як посушливо-теплій.

Вегетаційний період 2022 р. мав нормальний весняний розвиток (квітень –0,19; травень –0,68 за температурою, опади в межах норми). Однак у червні склалися екстремальні умови: аномально висока температура (+2,18) збіглася з гострим дефіцитом опадів (–2,41), що було найбільш несприятливим поєднанням серед усіх років досліджень. Ця посуха припала на критичний період колосіння – цвітіння, що могло суттєво обмежити фотосинтетичну діяльність та озерненість колоса.

Дефіцит вологи зберігався і в липні (–1,83), хоча температурний режим нормалізувався. В серпні спостерігалось часткове відновлення вологозабезпечення.

Вегетаційний період 2023 р. був найбільш сприятливим для фотосинтетичної діяльності посівів. Квітень характеризувався підвищеною вологістю (+1,72), що забезпечило хороші запаси вологи для весняного відростання. Травень, червень і липень мали температуру та опади в межах норми (коефіцієнти суттєвості –0,12...+0,97 та –0,95...+0,02 відповідно), що створювало оптимальні умови для формування листового апарату, накопичення хлорофілів та фотосинтетичної діяльності в критичні фази трубкування – колосіння – цвітіння. Погіршення відбулося лише в серпні (аномальна спека +2,78 при дефіциті вологи –1,99), проте основні елементи продуктивності до цього часу вже сформувалися.

Вегетаційний період 2024 р. був найспекотнішим і найпосушливішим серед усіх років досліджень. Вже в квітні температура суттєво перевищувала норму (+2,53), що прискорювало фенологічний розвиток рослин. Червень (+2,36), липень (+2,49) і серпень (+2,24) характеризувалися стійкою аномальною спекою. Кількість опадів у липні мала найбільше від'ємне відхилення серед усіх місяців за п'ять років (–2,27), а в серпні дефіцит вологи зберігався (–1,38). Тривалий теплий стрес у поєднанні з посухою суттєво прискорював деградацію хлорофілів, скорочував тривалість функціонування листового апарату та знижував фотосинтетичний потенціал і чисту продуктивність фотосинтезу.

Отже, найбільш критичним для фотосинтетичної діяльності було поєднання високих температур (коефіцієнт $>+2,0$) із дефіцитом опадів (коефіцієнт $<-2,0$) у період колосіння – цвітіння (червень 2022 р., липень 2024 р.), що спричиняло передчасне старіння листків, зниження вмісту хлорофілів та скорочення фотосинтетичного потенціалу.

Схема досліду передбачала повний факторіальний експеримент із 36 варіантів. Фактор А – сорт: Легенда білоцерківська, Манера одеська, Воздвиженка. Фактор Б – рівень удобрення: мінімальний ($N_{60}P_{40}K_{40}$), середній ($N_{120}P_{60}K_{60}$), максимальний ($N_{180}P_{90}K_{90}$ +мікроелементи). Фактор В – система захисту: хімічна та біологічна (ТАЕГРО, *Bacillus subtilis*, штам 1 BS 2020). Фактор Г – ретардант: Квантум-Аквасил та МОДДУС 250 ЕС. Площа облікової ділянки – 25 м², повторність чотириразова. Попередник – соя.

Площу листової поверхні визначали методом висічок (Nichiporovich A. A., 1961) у п'яти фазах: кушіння, вихід у трубку, колосіння, цвітіння, молочна стиглість. Вміст хлорофілів (a+b) – спектрофотометрично у ацетоновому екстракті (Wellburn A. R., 1994). Фотосинтетичний потенціал та чисту продуктивність фотосинтезу розраховували

за загальноприйнятими формулами (Nichiporovich A. A., 1961). Статистичну обробку проводили методами дисперсійного аналізу (Statistica 10.0, $P < 0,05$).

Результати та обговорення

Площа листової поверхні посівів пшениці озимої демонструвала характерну одновершинну криву з максимумом у фазі колосіння (табл. 1). У фазі

кущіння ПЛП становила в середньому $11,3 \pm 1,2$ тис. $\text{м}^2/\text{га}$. Найінтенсивніше наростання відбувалося у міжфазний період кущіння – трубкування, коли ПЛП зростала у 2,3 рази – до $26,1 \pm 2,8$ тис. $\text{м}^2/\text{га}$. Максимальних значень ПЛП досягала у фазі колосіння – $41,0 \pm 3,8$ тис. $\text{м}^2/\text{га}$ з коливаннями від 31,4 до 50,6 тис. $\text{м}^2/\text{га}$ залежно від варіанту.

Таблиця 1. Динаміка площі листової поверхні пшениці озимої, тис. $\text{м}^2/\text{га}$ (2020–2024 рр.)

Варіант	Кущіння	Трубкування	Колосіння	Цвітіння	Молочна
Середнє	$11,3 \pm 1,2$	$26,1 \pm 2,8$	$41,0 \pm 3,8$	$38,8 \pm 3,5$	$29,2 \pm 2,9$
$N_{60}P_{40}K_{40}$	$9,7 \pm 0,9$	$21,9 \pm 2,1$	$34,8 \pm 3,0$	$32,8 \pm 2,7$	$24,8 \pm 2,3$
$N_{120}P_{60}K_{60}$	$11,3 \pm 1,1$	$25,8 \pm 2,5$	$41,1 \pm 3,6$	$39,0 \pm 3,3$	$29,2 \pm 2,8$
$N_{180}P_{90}K_{90} + \text{мікро}$	$12,9 \pm 1,3$	$30,4 \pm 3,1$	$47,0 \pm 4,2$	$44,5 \pm 3,9$	$33,5 \pm 3,2$
Приріст, %	+33	+39	+35	+36	+35

Рівень мінерального удобрення виявив найпотужніший вплив на ПЛП серед усіх факторів. Підвищення дози добрив від $N_{60}P_{40}K_{40}$ до $N_{180}P_{90}K_{90} + \text{мікроелементи}$ забезпечило зростання максимальної ПЛП на 35 % – від $34,8 \pm 3,0$ до $47,0 \pm 4,2$ тис. $\text{м}^2/\text{га}$. Цей ефект зумовлений стимулюванням синтезу білків та нуклеїнових кислот за підвищеного азотного живлення, формуванням більшої кількості продуктивних пагонів та подовженням періоду активного функціонування листового апарату.

Сорти суттєво відрізнялися за величиною ПЛП: Легенда білоцерківська формувала найбільшу

листову поверхню ($42,7 \pm 4,0$ тис. $\text{м}^2/\text{га}$), Воздвиженка – середню ($41,5 \pm 3,9$), Манера одеська – найменшу ($38,8 \pm 3,5$). Легенда також демонструвала найповільніше зниження ПЛП після колосіння: у фазі молочної стиглості зберігалася 73 % від максимуму проти 70–71 % в інших сортів.

Вміст хлорофілів (a+b) у листках пшениці озимої демонстрував динаміку з максимумом у фазі колосіння (табл. 2). У фазі кущіння вміст хлорофілів становив $2,83 \pm 0,14$ мг/г сирої маси, а максимальних значень досягав у фазі колосіння – $3,68 \pm 0,21$ мг/г з варіюванням від 3,18 до 4,17 мг/г.

Таблиця 2. Вміст хлорофілів (a+b) у листках пшениці озимої, мг/г сирої маси (2020–2024 рр.)

Варіант	Кущіння	Трубкування	Колосіння	Цвітіння	Молочна стиглість
Середнє	$2,83 \pm 0,14$	$3,43 \pm 0,17$	$3,68 \pm 0,21$	$3,44 \pm 0,19$	$2,57 \pm 0,16$
$N_{60}P_{40}K_{40}$	$2,60 \pm 0,12$	$3,18 \pm 0,15$	$3,38 \pm 0,18$	$3,16 \pm 0,16$	$2,35 \pm 0,13$
$N_{120}P_{60}K_{60}$	$2,84 \pm 0,13$	$3,42 \pm 0,16$	$3,68 \pm 0,20$	$3,43 \pm 0,18$	$2,58 \pm 0,15$
$N_{180}P_{90}K_{90} + \text{мікро}$	$3,05 \pm 0,15$	$3,71 \pm 0,19$	$3,99 \pm 0,23$	$3,73 \pm 0,21$	$2,80 \pm 0,17$
Приріст, %	+17	+17	+18	+18	+19

Підвищення удобрення забезпечило приріст хлорофілів на 18 % ($+0,61$ мг/г), що суттєво менше порівняно з приростом ПЛП (+35 %). Це свідчить про переважно екстенсивний характер впливу удобрення на фотосинтетичну потужність. Сорт Воздвиженка характеризувався найвищим вмістом хлорофілів ($3,77 \pm 0,22$ мг/г), Легенда білоцерківська – проміжним ($3,70 \pm 0,20$), Манера одеська – найнижчим ($3,58 \pm 0,19$). МОДДУС 250 ЕС

підвищував концентрацію пігментів на 2,5 % порівняно з Квантум-Аквасил ($3,73$ проти $3,64$ мг/г), що пояснюється концентруванням пігментів у більш компактних листках.

Фотосинтетичний потенціал за вегетацію становив у середньому $2,99 \pm 0,38$ млн $\text{м}^2 \cdot \text{дб}/\text{га}$ з варіюванням від 2,32 до 3,78 млн $\text{м}^2 \cdot \text{дб}/\text{га}$ (табл. 3, рис. 3). Різниця у 63 % між крайніми варіантами свідчить про значний потенціал оптимізації.

Таблиця 3. Фотосинтетичний потенціал пшениці озимої, млн $\text{м}^2 \cdot \text{дб}/\text{га}$ (2020–2024 рр.)

Варіант	Кущіння–Вихід в трубку	Трубкування–Колосіння	Колосіння–Цвітіння	Цвітіння–Молочна стиглість	За вегетацію
Середнє	$0,52 \pm 0,05$	$1,03 \pm 0,10$	$0,57 \pm 0,06$	$0,89 \pm 0,09$	$2,99 \pm 0,38$
$N_{60}P_{40}K_{40}$	$0,44 \pm 0,04$	$0,86 \pm 0,08$	$0,48 \pm 0,05$	$0,74 \pm 0,07$	$2,52 \pm 0,30$
$N_{120}P_{60}K_{60}$	$0,53 \pm 0,05$	$1,02 \pm 0,09$	$0,57 \pm 0,06$	$0,90 \pm 0,08$	$3,00 \pm 0,36$
$N_{180}P_{90}K_{90} + \text{мікро}$	$0,61 \pm 0,06$	$1,19 \pm 0,11$	$0,66 \pm 0,07$	$1,03 \pm 0,10$	$3,46 \pm 0,42$
Приріст, %	+39	+38	+38	+39	+37

Найбільшу частку ФП (34,5 %) формував період виходу в трубку – колосіння (1,03 млн м²·діб/га), а період цвітіння – молочна стиглість забезпечував 29,8 %. Легенда білоцерківська характеризується найвищим ФП

(3,18±0,40 млн м²·діб/га), Воздвиженка – 2,98±0,37, Манера одеська – 2,82±0,34.

ЧПФ демонструвала максимум у період трубкування – колосіння – 6,45±0,48 г/м²·добу (табл. 4). Середня ЧПФ за вегетацію становила 5,08±0,32 г/м²·добу.

Таблиця 4. Чиста продуктивність фотосинтезу пшениці озимої, г/м²·добу (2020–2024 рр.)

Варіант	Кушіння–Вихід в трубку	Трубкування – Колосіння	Колосіння–Цвітіння	Цвітіння–Молочна стиглість	За вегетацію
Середнє	4,71±0,31	6,45±0,48	5,11±0,38	4,05±0,30	5,08±0,32
Воздвиженка	4,92±0,33	6,76±0,51	5,35±0,40	4,26±0,32	5,32±0,34
Легенда білоц.	4,75±0,30	6,45±0,47	5,14±0,37	4,04±0,29	5,11±0,31
Манера одеська	4,46±0,28	6,14±0,44	4,84±0,35	3,84±0,27	4,80±0,29
Квантум-Аквасил	4,59±0,30	6,35±0,46	5,02±0,36	3,99±0,28	4,99±0,30
МОДДУС 250 ЕС	4,84±0,32	6,55±0,49	5,21±0,39	4,11±0,31	5,17±0,33

Аналіз впливу удобрення на ЧПФ виявив підвищення дози від мінімальної до максимальної практично не вплинуло на середню ЧПФ (4,97 проти 5,04 г/м²·добу, приріст лише 1,3 %). Це пояснюється посиленням взаємного затінення листків у густому посіві. Натомість сортовий фактор суттєво впливав: Воздвиженка перевищувала Манеру одеську на 11 % за ЧПФ, що пов'язано з оптимальною архітектонікою рослин та вищим вмістом

хлорофілів. МОДДУС 250 ЕС забезпечував ЧПФ на 3,6 % вищу за Квантум-Аквасил завдяки покращенню світлового режиму у посіві.

Регресійний аналіз, виконаний за чотирма рівнями азотного живлення з включенням абсолютного контролю без удобрення (N₀), виявив принципово різний характер залежності показників фотосинтетичної діяльності від дози азотного удобрення (рис. 1).

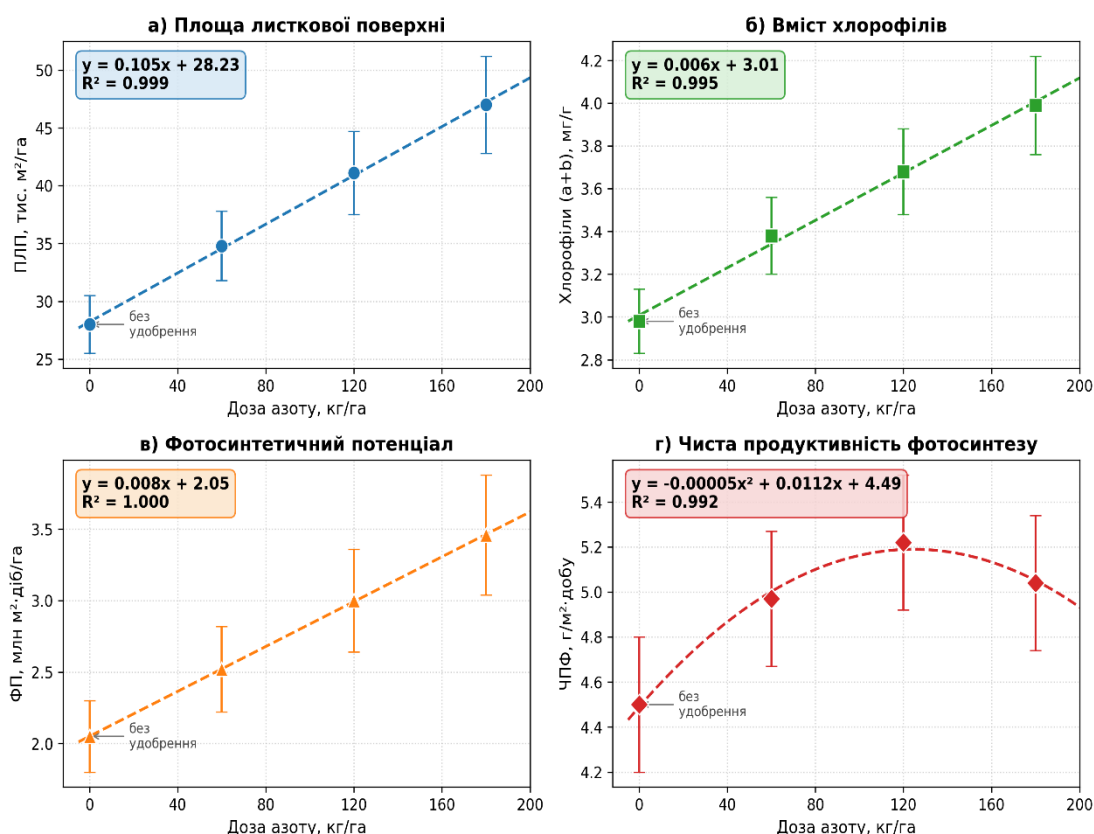


Рис. 1. Залежність параметрів фотосинтетичної активності пшениці озимої від дози азотного удобрення (за 2020–2024 рр.)

Площа листової поверхні, вміст хлорофілів та фотосинтетичний потенціал демонстрували

лінійну залежність від дози азоту з високими коефіцієнтами детермінації ($R^2 = 0,992–1,000$).

Зокрема, кожен додатковий 10 кг/га азоту забезпечували приріст ПЛП на 1,05 тис. м²/га (рис. 1а), вмісту хлорофілів — на 0,06 мг/г (рис. 1б) та ФП — на 0,08 млн м²·дб/га (рис. 1в). Лінійність цих залежностей свідчить про те, що навіть максимальна доза N₁₈₀ не досягла порогу насичення асиміляційного апарату за кількісними параметрами. Натомість ЧПФ описувалася параболічною залежністю: за відсутності удобрення вона становила лише 4,50 г/м²·добу (обмеження фотосинтетичного апарату за дефіциту азоту), зростала до максимуму при N₁₂₀ (5,22 г/м²·добу), після чого відбувалося незначне зниження до 5,04 г/м²·добу при N₁₈₀ (рис. 1г). Це підтверджує що надмірне нарощування листової поверхні посилює взаємне затінення листків і знижує середню ефективність роботи фотосинтетичного апарату. З практичної точки зору, це вказує на доцільність оптимізації не лише дози добрив, а й архітектури посіву шляхом добору сортів із вертикальною орієнтацією верхніх листків, що простежується в працях інших вчених (Zhu X. G. et al., 2010; Parry M. A. J. et al., 2011).

Комплексна оцінка впливу рівнів удобрення (рис. 2) дозволила візуалізувати диспропорції між кількісними та якісними параметрами фотосинтезу. За мінімального удобрення (N₆₀P₄₀K₄₀) показники ПЛП, хлорофілів та ФП становили лише 74–85 % від максимальних значень, тоді як ЧПФ сягала 95 % від найвищого рівня. Середнє удобрення (N₁₂₀P₆₀K₆₀) забезпечувало збалансований профіль із ЧПФ на рівні 100 % від максимуму при 87–95 % кількісних показників. Максимальне удобрення (N₁₈₀P₉₀K₉₀+мікроелементи) виводило всі кількісні показники на 100 %, проте ЧПФ знижувалася до 97 %. Збереження ПЛП у фазі молочної стиглості практично не відрізнялося між рівнями удобрення (71–73 % від максимуму фази колосіння), що свідчить про однакову інтенсивність старіння листового апарату незалежно від фону живлення. Таким чином, середній рівень удобрення забезпечує оптимальне співвідношення між кількісними та якісними параметрами фотосинтетичної діяльності, що узгоджується з концепцією збалансованого живлення.

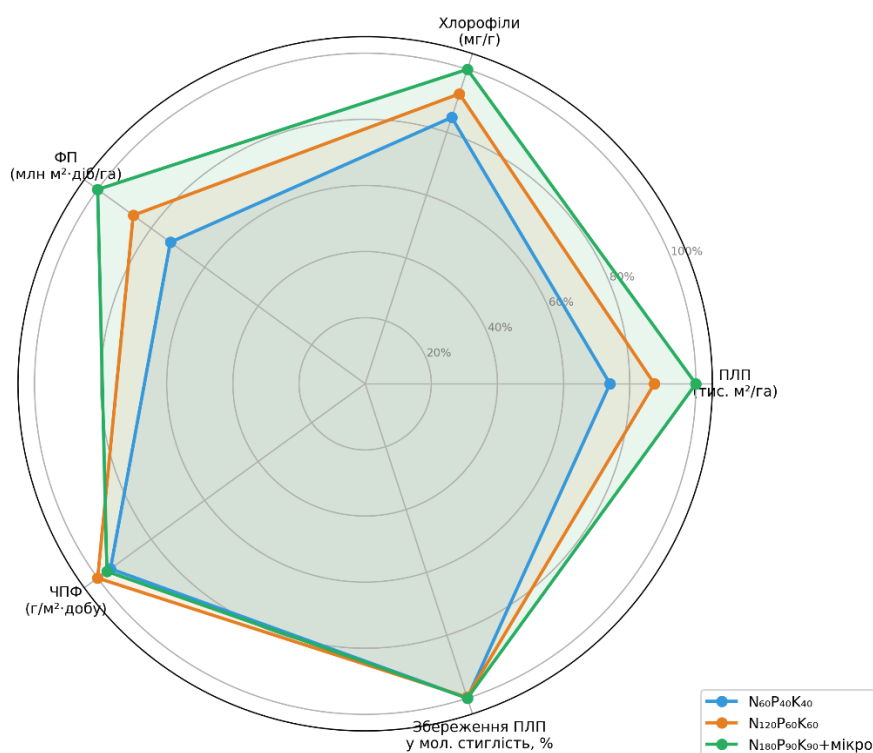


Рис 2. Радіальна діаграма порівняння трьох рівнів удобрення за показниками фотосинтетичної активності

Аналіз кореляційної матриці (рис. 3) виявив диференційований характер взаємозв'язків між показниками фотосинтетичної діяльності та рівнем азотного живлення. Найсильніші позитивні кореляції встановлено між ПЛП та ФП ($r = 0,999$), ПЛП та хлорофілами ($r = 0,965$), а також між хлорофілами та ЧПФ ($r = 0,983$). Доза азоту демонструвала високу позитивну кореляцію з ПЛП ($r = 0,704$), ФП ($r = 0,707$) та хлорофілами ($r = 0,719$), що підтверджує лінійний характер впливу

удобрення на кількісні параметри фотосинтезу. Водночас кореляція дози азоту з ЧПФ була помітно слабшою ($r = 0,559$), що кількісно характеризує вплив удобрення. Практичне значення має тісний зв'язок між вмістом хлорофілів та ЧПФ ($r = 0,983$): це дозволяє використовувати оперативне визначення хлорофілів (наприклад, хлорофілометром SPAD) як непрямий показник ефективності роботи фотосинтетичного апарату у виробничих умовах. За шкалою Чеддока зв'язки

доза азоту з ПЛП, ФП та хлорофілами кваліфікуються як високі ($r = 0,70\text{--}0,72$), тоді як із ЧПФ — лише як помітний ($r = 0,559$), що показує переважно екстенсивний механізм впливу

удобрення; натомість взаємозв'язки між власне параметрами фотосинтетичного апарату (ПЛП, хлорофіли, ФП, ЧПФ) сягають градації дуже високих ($r = 0,95\text{--}0,999$).

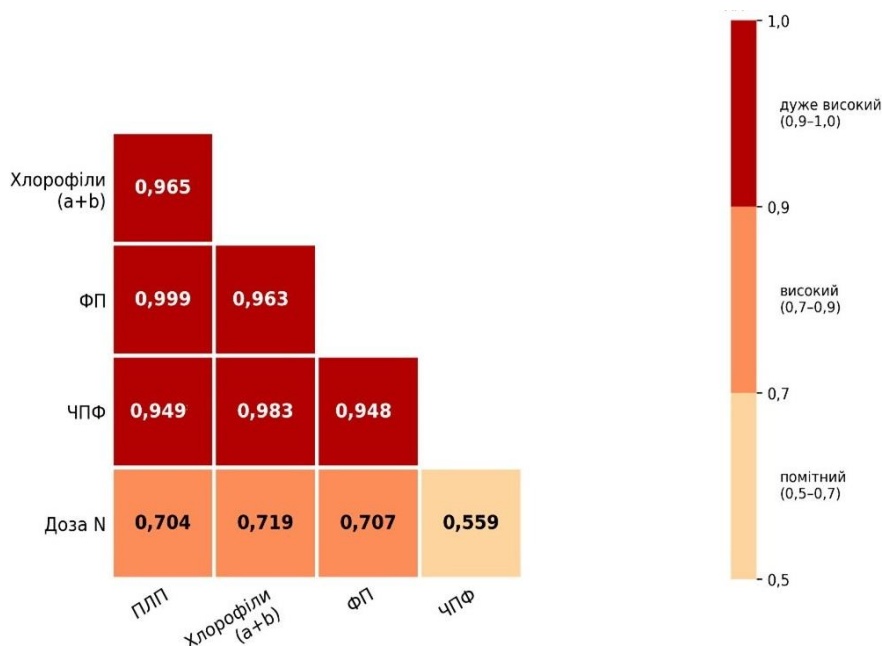


Рис. 3. Кореляційна матриця показників фотосинтетичної активності пшениці озимої (ПЛП, хлорофіли, ФП, ЧПФ, доза N) з градацією сили зв'язку за шкалою Чеддока ($n = 12$; $P < 0,05$)

Аналіз структури фотосинтетичного потенціалу за міжфазними періодами (рис. 4) засвідчив, що підвищення рівня удобрення збільшувало ФП пропорційно в усі періоди вегетації зі збереженням відносної структури. Незалежно від рівня удобрення, найбільший внесок у загальний ФП забезпечував період трубкування — колосіння (34–35 %), найменший — кушіння — трубкування (17–18 %). Період цвітіння — молочна стиглість, критичний для наливу зерна, формував 29–30 %

загального ФП. За мінімального удобрення загальний ФП становив 2,52 млн $\text{м}^2 \cdot \text{діб}/\text{га}$, за середнього — 3,02, за максимального — 3,49 млн $\text{м}^2 \cdot \text{діб}/\text{га}$. Приріст ФП між мінімальним та максимальним рівнями удобрення розподілявся між міжфазними періодами практично рівномірно (+37–39 %), що свідчить про стабільний позитивний вплив підвищеного мінерального живлення на тривалість та інтенсивність функціонування листового апарату впродовж усієї вегетації.

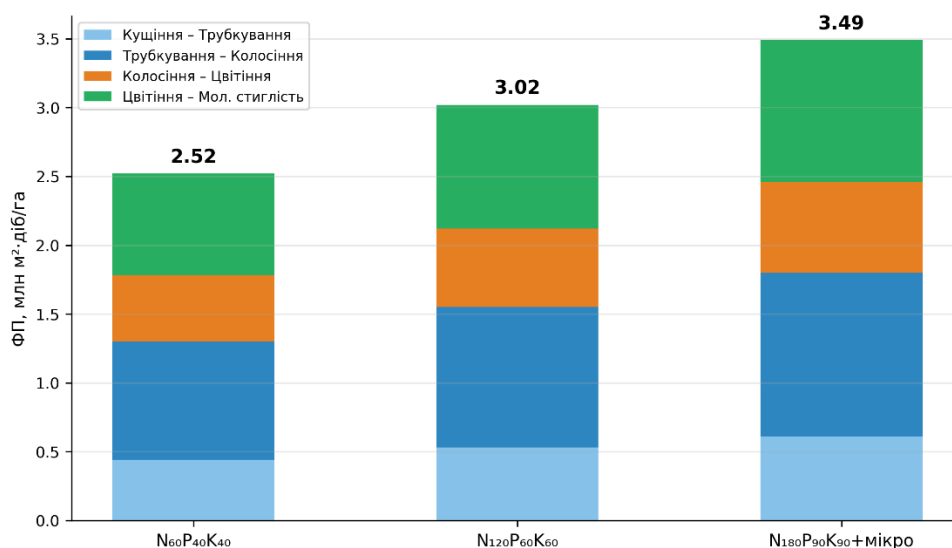


Рис. 4. Структура ФП: діаграма з накопиченням за міжфазними періодами для кожного рівня удобрення

Для формування 1 т зерна за наших умов необхідний ФП на рівні 420–490 тис. м²·діб, що відповідає літературним даним (Nichiporovich A. A., 1961; Petrychenko V. F., Lykhochvor V. V., 2020; Kleczewski & Whaley, 2018). Відтак, заходи з

Висновки

За результатами досліджень встановлено два механізми формування фотосинтетичної продуктивності посівів пшениці озимої, що визначають стратегію оптимізації технології вирощування: екстенсивний реалізується через мінеральне удобрення, яке лінійно збільшує кількісні параметри асиміляційного апарату (ПЛП на 35 % та ФП на 37 %) за мінімального впливу на якісний показник (ЧПФ, +1,3 %); та інтенсивний — реалізується через добір сорту й застосування ретарданту, які підвищують ефективність роботи листового апарату (ЧПФ на 3,6–11,0 %) без нарощування площі листя. Розмежування цих механізмів є методичною основою для диференційованого добору елементів технології вирощування під конкретну виробничу мету.

Доза мінерального живлення N₁₂₀P₆₀K₆₀ забезпечує найкраще співвідношення показників фотосинтезу посівів пшениці: ЧПФ досягає максимуму (5,22 г/м²·добу) за рівня ПЛП, хлорофілів та ФП 87–95 % від максимально удобреного варіанта. Подальше підвищення дози до N₁₈₀P₉₀K₉₀ знижує ЧПФ (до 5,04 г/м²·добу) внаслідок посилення взаємного затінення листків, через що економічно та фізіологічно виправдане лише за цілеспрямованого нарощування ФП, скажімо з метою формування високоякісного насіння.

Серед досліджених елементів технології визначено кращі варіанти за фотосинтетичною активністю: за сортом — Воздвиженка (найвищі

оптимізації фотосинтетичної діяльності необхідно спрямовувати насамперед на збільшення ФП у період трубкування — колосіння, який визначає до третини загального фотосинтетичного потенціалу посіву.

ЧПФ 5,32±0,34 г/м²·добу та вміст хлорофілів) для інтенсивного типу і Легенда білоцерківська (найвищий ФП 3,18±0,40 млн м²·діб/га) для екстенсивного; за ретардантом — МОДДУС 250 ЕС, який попри зменшення ПЛП на 5 % підвищує вміст хлорофілів на 2,5 % та ЧПФ на 3,6 % завдяки оптимізації світлового режиму посіву. Критичним для оптимізації є період трубкування — колосіння, що формує 34–35 % загального ФП і максимальні значення ПЛП (41,0±3,8 тис. м²/га) та хлорофілів (3,68±0,21 мг/г), тому агрозаходи доцільно проводити саме в цій фазі.

Установлений дуже високий кореляційний зв'язок між вмістом хлорофілів та ЧПФ (r = 0,983) дає змогу використовувати оперативне визначення хлорофілів (хлорофілометр SPAD) як непрямий експрес-індикатор ефективності фотосинтезу для коригування азотного живлення в системах точного землеробства. На підставі визначених кращих варіантів рекомендовано два оптимізовані комплекси елементів технології: для максимізації фотосинтетичного потенціалу — Легенда білоцерківська + N₁₈₀P₉₀K₉₀ + хімічний захист + Квантум-Аквасил (ФП = 3,78 млн м²·діб/га); для максимізації ефективності фотосинтезу за помірних витрат — Воздвиженка + N₁₂₀P₆₀K₆₀ + хімічний захист + МОДДУС 250 ЕС. Орієнтиром оптимізації фотосинтетичної активності посівів є потреба у ФП на рівні 420–490 тис. м²·діб для формування 1 т зерна.

Список використаної літератури

Driever S. M., Lawson T., Andralojc P. J., Raines C. A., Parry M. A. J. (2014). Natural variation in photosynthetic capacity, growth, and yield in 64 field-grown wheat genotypes. *Journal of Experimental Botany*, 65(17), 4959–4973. DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/eru253>

Dubyt'ska A., Kachmar O., Dubyt'skyi O. (2023). Influence of biologized fertilization systems on physical and chemical properties of soil under winter wheat. *Agroscience and Practice*, 2(2), 11–18. DOI: [https://doi.org/10.32636/agroscience.2023-\(2\)-2-2](https://doi.org/10.32636/agroscience.2023-(2)-2-2)

Dubyt'skyi O., Kachmar O., Dubyt'ska A., Vavrynovych O. (2023). Influence of biologized fertilization systems on the development of major diseases of winter wheat and its productivity. *Agroscience and Practice*, 2(3), 18–26. DOI: [https://doi.org/10.32636/agroscience.2023-\(2\)-3-3](https://doi.org/10.32636/agroscience.2023-(2)-3-3)

Evans J. R. (2013). Improving photosynthesis. *Plant Physiology*, 162(4), 1780–1793. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.113.219006>

Hospodarenko H. M. (2016). Fertilization of agricultural crops. Kyiv: SIK hrup UKRAINA, 276 p.

Kachmar O., Dubyt'ska A., Shcherba M., Saveryn I., Taravska O. (2023). Influence of fertilization systems on agrophysical soil state and productivity of row crops. *Agroscience and Practice*, 2(1), 21–29. DOI: [https://doi.org/10.32636/agroscience.2023-\(2\)-1-3](https://doi.org/10.32636/agroscience.2023-(2)-1-3)

Kleczewski, N. M., & Whaley, C. (2018). Assessing the utility of the growth regulator trinexapac-ethyl and fungicides in mid-Atlantic soft red winter wheat production systems. *Crop Protection*, 104, 60–64. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2017.10.011>

Li, H., Zhao, J., Feng, H., Huang, L., & Kang Z. (2013). Biological control of wheat stripe rust by an

endophytic *Bacillus subtilis* strain E1R-j in greenhouse and field trials. *Crop Protection*, 43, 201–206. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2012.09.008>

Morhun V. V., Sanin Ye. Yu., Shvartau V. V. (2014). Club of 100 centners. Modern varieties and systems of nutrition and protection of winter wheat. Kyiv: Lohos, 148 p.

Nichiporovich A. A. (1961). Photosynthetic activity of plants in crops. AN SSSR, 136 p.

Parry M. A. J., Reynolds M. P., Salvucci M. E., Raines C., Andralojc P. J., Zhu X. G., Price G. D., Condon A. G., Furbank R. T. (2011). Raising yield potential of wheat. II. Increasing photosynthetic capacity and efficiency. *Journal of Experimental Botany*, 62(2), 453–467. DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/erq304>

Petrychenko V. F., Lykhochvor V. V. (2020). Plant production. New technologies for growing field crops. 5th ed. Lviv: Ukrainski tekhnolohii, 806 p. DOI: <https://doi.org/10.31073/roslynnytstvo5vydannya>

Rademacher W. (2015). Plant growth regulators: backgrounds and uses in plant production. *Journal of Plant Growth Regulation*, 34(4), 845–872. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00344-015-9541-6>

Rudavska, N., Grechesnyuk, O., Begen, L. (2025). Formation of individual elements of winter wheat productivity depending on agrotechnological measures. *Agroscience and Practice*, 4(3), 27–32. [https://doi.org/10.32636/agroscience.2025-\(4\)-3-5](https://doi.org/10.32636/agroscience.2025-(4)-3-5)

Shvartau, V. V., Mykhalska, L. M., Makoveychuk, T. I. (2018). The content of trace elements in winter wheat plants under the action of retardants. *Plant Physiology and Genetics*, 50(6), 474–483. <https://doi.org/10.15407/frg2018.06.474>

Wellburn A. R. (1994). The spectral determination of chlorophylls a and b, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution. *Journal of Plant Physiology*, 144(3), 307–313. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(11\)81192-2](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(11)81192-2)

Zhu X. G., Long S. P., Ort D. R. (2010). Improving photosynthetic efficiency for greater yield. *Annual Review of Plant Biology*, 61, 235–261. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042809-112206>

PATTERNS OF PHOTOSYNTHETIC ACTIVITY OF WINTER WHEAT AS AFFECTED BY MINERAL FERTILIZATION AND BIOLOGIZATION PRACTICES

Oleh PRYSIAZHNIUK, ORCID: 0000-0002-4639-424X

Nadiya KONONIUK, ORCID: 0000-0002-5313-4999

Tamara SHEVCHENKO, ORCID: 0000-0001-9488-0325

Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beets of NAAS

The results of a five-year study (2020–2024) on the photosynthetic activity of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) as affected by mineral fertilization level, varietal characteristics, the application of growth retardants, and plant protection systems on a typical low-humus medium-loamy chernozem in the Right-Bank Forest-Steppe of Ukraine are presented. The full-factorial experiment comprised 36 treatments combining three varieties ('Lehenda Bilotserkivska', 'Manera Odeska', and 'Vozdvyzhenka'), three fertilization levels ($N_{60}P_{40}K_{40}$, $N_{120}P_{60}K_{60}$, and $N_{180}P_{90}K_{90}$ supplemented with micronutrients), two plant protection systems (chemical and biological, the latter based on TAEGRO), and two growth retardants (Quantum-Aquasil and MODDUS 250 EC). Mineral fertilization had the strongest effect on leaf area and photosynthetic potential, increasing these parameters by 35 and 37%, respectively, while exerting only a minor influence on net photosynthetic productivity (+1.3%). Two pathways for enhancing photosynthetic productivity were identified: an extensive pathway, associated with fertilization and an increase in leaf area and photosynthetic potential, and an intensive pathway, associated with varietal characteristics and growth-retardant application, which increased net photosynthetic productivity. The maximum leaf area reached 41.0 ± 3.8 thousand m^2/ha at the heading stage. The variety 'Vozdvyzhenka' exhibited the highest net photosynthetic productivity (5.32 g/m^2 per day), whereas 'Lehenda Bilotserkivska' had the highest photosynthetic potential (3.18 million $m^2 \cdot days/ha$). MODDUS 250 EC increased net photosynthetic productivity by 3.6% despite reducing leaf area by 5%.

Keywords: winter wheat, photosynthetic activity, leaf area, chlorophyll, photosynthetic potential, net photosynthesis productivity, mineral fertilization, retardants, variety.

This is an open-access article under the terms of the Creative Commons

Отримано: 26.2.2026

Погоджено до друку: 6.8.2026

Опубліковано: 30.9.2026

SELECTION OF HIGHLY ADAPTABLE CROPS FOR CONTROLLED ECOLOGICAL LIFE SUPPORT SYSTEMS UNDER SIMULATED ENVIRONMENTAL CONDITIONSWei TAO^{1,2}, PhD, ORCID: 0009-0001-4843-9018Olha BAKUMENKO¹, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, Senior Researcher, Laboratory of Mechanical and Chemical Impact in Agrotechnologies, ORCID: 0000-0003-1625-7401Oksana DATSKO¹, PhD in Agronomy, Senior lecturer, Senior researcher, Senior Researcher, Laboratory of Mechanical and Chemical Impact in Agrotechnologies, ORCID: 0000-0001-9610-3087¹Sumy National Agrarian University, 160 H. Kondratieva St., Sumy, 40021, Ukraine²Shangdong Agriculture and Engineering University, Jinan, Shandong, *People's Republic of China*
e-mail: lady.bakumenko88@gmail.com

The development of plant cultivation technologies in controlled environments requires the identification of species capable of efficient functioning in closed or semi-closed ecological systems with limited resources. One of the promising directions in this field is the use of Controlled Ecological Life Support Systems (CELSS), where plants perform key functions in maintaining gas balance, participating in water and biogeochemical cycles, and producing fresh food biomass. The aim of this study was to substantiate approaches for selecting plant species with high adaptive potential for cultivation under controlled environmental conditions and to develop an experimental platform for investigating their growth and functional characteristics. Based on an analysis of international research and existing crop selection criteria for bioregenerative systems, a set of principles for selecting promising crops was formulated, considering ecological adaptability, morphological traits, nutritional value, and technological suitability for cultivation in regulated environments. As candidate species, *Mesembryanthemum crystallinum* L., *Anredera cordifolia* (Ten.) Steenis, and *Anoectochilus roxburghii* (Wall.) Lindl. were proposed due to their compact morphology, high nutritional and bioactive compound content, and potential suitability for cultivation in limited space conditions. To evaluate their adaptive potential, an experimental facility, the Micro-Lunar Greenhouse System (MLGS), was designed to simulate key parameters of a controlled environment, including temperature, humidity, atmospheric gas composition, light conditions, and nutrient solution characteristics. A standardized cultivation experiment scheme and a system for evaluating morphological, physiological, biochemical, and resource efficiency indicators were proposed. The obtained results provide a methodological basis for further studies on plant adaptation in controlled ecological systems and may contribute to the development of cultivation technologies for closed growing environments.

Keywords: Controlled Ecological Life Support Systems, CELSS, controlled environment agriculture, crop selection, plant adaptation, closed ecological systems, Micro-Lunar Greenhouse System, simulated environment

Стаття з відкритим доступом на умовах ліцензії Creative Commons

Introduction

Deep space exploration missions, including the construction of lunar bases and future Mars expeditions, increasingly focus on long-term human presence beyond Earth. Under such conditions, life support technologies capable of sustaining astronauts in extraterrestrial environments become one of the key limiting factors for mission implementation. Controlled Ecological Life Support Systems (CELSS) represent an integrated technological approach that enables the regeneration and recycling of essential life-support resources such as oxygen, water and food within a closed ecological loop. These systems rely on artificial ecosystems integrating plants, microorganisms, animals and humans to maintain material circulation and ecological balance. Due to their low resource consumption, high sustainability and high degree of closure, CELSS technologies are considered fundamental for long-duration extraterrestrial habitation missions (Wheeler R.M., 2017; Bakumenko O. et al., 2026).

Within CELSS, crop cultivation plays a central biological role. Plants not only provide fresh food and diversified nutritional sources for astronauts, but also perform critical ecological functions such as carbon dioxide fixation, oxygen release, water purification and

waste recycling. Therefore, the selection of crop species and the optimization of cultivation technologies directly influence the efficiency of material circulation, the nutritional stability of astronaut diets and the long-term operational reliability of CELSS systems.

Over the past several decades, major spacefaring nations including China, the United States, European countries and Japan have conducted extensive research on CELSS-based crop cultivation. Various experimental platforms and technical models have been developed to investigate the feasibility of growing crops such as wheat, lettuce and tomato under simulated or real space conditions. These studies have demonstrated the possibility of partial regeneration of oxygen, water and food in closed ecological systems (Dong C. et al., 2015; Abe K., et al., 2005; Nitta K., et al., 2001). Nevertheless, the currently tested crops still exhibit several limitations. Many species lack a balanced nutritional profile and do not provide important nutrients such as ω -3 polyunsaturated fatty acids, vitamin B12, iron and zinc. In addition, some crops have relatively large plant architectures, making them unsuitable for limited spacecraft or habitat space. Other crops demonstrate insufficient ecological adaptability, including high

water consumption or relatively low photosynthetic efficiency, which restricts the improvement of system closure and overall resource efficiency.

Research progress of CELSS crop cultivation in different countries. Different countries have developed distinctive CELSS crop cultivation models according to their space exploration strategies and technological priorities. These models differ in terms of experimental platform design, crop selection principles and system functional orientation. Their research results provide important theoretical and methodological foundations for crop selection, experimental device construction and cultivation experiment design.

China has focused on long-term extraterrestrial habitation scenarios and developed two representative research platforms: the Lunar Palace-1 ground simulation system and plant cultivation experiments conducted aboard the Tiangong Space Station. The Lunar Palace-1 facility has a total volume of approximately 160 m³ and contains two plant cultivation cabins with a total planting area of 69 m², together with a comprehensive cabin and a waste treatment unit. The system combines substrate cultivation with hydroponic technologies and forms a four-component material circulation loop involving plants, animals, microorganisms and humans. During 105-day and 365-day closed ecological experiments, dozens of crop species were cultivated, achieving 100% oxygen regeneration, more than 95% water regeneration and approximately 55–80% food regeneration, while the overall system closure approached 98% (Dong C. et al., 2015). The key advantage of the Chinese model lies in its highly integrated material cycling system, where crop selection prioritizes ecosystem functionality, long-term environmental adaptability and nutritional diversity.

The United States has primarily oriented its CELSS research toward near-Earth orbit missions and shorter lunar exploration scenarios. Its approach emphasizes fresh food production for astronauts through systems designed for immediate harvest and consumption. Several experimental platforms have been developed, including Veggie, the Advanced Plant Habitat (APH) and the CHAPEA simulation environment. The Veggie system employs a “seed pillow” planting method combined with red-blue LED lighting, enabling the first successful harvest of lettuce in space in 2015 and marking a milestone in astronaut consumption of fresh vegetables during orbital missions. The APH facility provides precise control of temperature, humidity and atmospheric composition. In 2022, pepper plants cultivated in this system produced 15–20 fruits per plant during a 110-day growth cycle, representing a significant advancement in space crop diversity (Morrow R.C. et al., 2017). The American model emphasizes compact plant architecture, rapid growth cycles, high nutritional density and good taste acceptance. Dwarf cultivars such as Outredgeous lettuce and Red Robin tomato have demonstrated strong adaptability to space cultivation conditions. Selection criteria developed in these programs, including

microgravity tolerance, nutritional efficiency and system integration capability, provide important methodological references for crop screening in CELSS research (Morrow R.C. et al., 2016).

In Europe, the European Space Agency (ESA) has developed the MELiSSA (Micro-Ecological Life Support System Alternative) program, which represents one of the most advanced bioregenerative life support concepts. MELiSSA is characterized by a five-stage ecological loop integrating microorganisms and plants to mimic natural terrestrial biogeochemical cycles. Through this system, organic waste can be decomposed and transformed into usable nutrients, supporting the life requirements of a four-person crew for up to two years without external supply (Dong C. et al., 2015). Crops such as wheat, potato, lettuce and spirulina have been incorporated into the system due to their compatibility with microbial metabolic cycles and their contribution to efficient resource recycling (Lasseur C., et al., 1996). Furthermore, European research programs have explored the cultivation of medicinal plants under controlled environments to address health challenges associated with long-term space missions. These studies provide important inspiration for selecting crops that combine both nutritional and medicinal value.

Japan has also developed advanced closed ecological systems, particularly the Closed Ecology Experiment Facilities (CEEF) designed for future lunar base and asteroid exploration missions. The CEEF facility simulates closed environmental conditions with volumes ranging from 50 to 100 m³ and supports small crews of two astronauts. By combining physical-chemical technologies with biological processes, the system can maintain CO₂ concentrations at approximately 0.1–0.2% while regulating water and oxygen cycles. Core crops in the Japanese system include rice, wheat and lettuce, selected for their rapid growth and high vitamin content. Experimental results have shown that rice cultivated in the simulation chamber can shorten its growth cycle by 10–15 days while achieving yields of approximately 0.8–1.0 kg·m⁻². In addition, an efficient gas circulation system increases CO₂ absorption efficiency by about 30% compared with conventional cultivation systems, while water recycling rates exceed 93% (Nitta K., et al., 2001). The compact design and precise environmental regulation of the Japanese system provide valuable guidance for developing miniaturized experimental platforms for CELSS crop research.

Limitations of existing CELSS crop experiments. Despite significant progress in CELSS research worldwide, several limitations remain in current crop cultivation systems. Many of the species previously tested cannot fully meet the requirements of long-term extraterrestrial habitation due to limitations related to nutrition, spatial efficiency, cultivation management and ecological cycle integration.

First, the nutritional structure of currently tested crops is often incomplete. Many cultivated species lack important micronutrients such as vitamin B12, vitamin

D, iron and zinc. In addition, essential fatty acids such as ω -3 polyunsaturated fatty acids are insufficiently represented in many crops, which may negatively affect cardiovascular health and intestinal stability. Staple crops such as wheat and rice also contain relatively low levels of lysine and threonine, limiting their protein nutritional value (Morrow R.C., et al., 2017).

Second, space utilization efficiency remains a major challenge. Crops such as wheat and maize may reach heights of 1–1.5 m, occupying considerable vertical space that could otherwise be used for multilayer cultivation systems. Some species also exhibit low leaf area index and limited light-use efficiency, resulting in suboptimal productivity per unit cultivation volume and inefficient resource utilization (Morrow R.C. et al., 2016; Morrow R.C., et al., 2017).

Third, cultivation and management complexity may increase operational demands on astronauts. Certain tuber crops such as potato require specialized substrates and harvesting procedures, which increase labor requirements in space environments. Some food crops also have relatively long growth cycles exceeding 100 days, which limits the ability to maintain continuous food supply and rapid crop turnover in closed systems (Dong C. et al., 2015).

Furthermore, insufficient ecological adaptability remains a challenge for many crops. Variations in water use efficiency can impose additional pressure on water recycling systems, while crops with low photosynthetic capacity contribute less effectively to CO₂ fixation and oxygen regeneration, reducing the overall efficiency of the CELSS material cycle.

Crop selection criteria and candidate species.

Given these limitations, the selection of new crop species that combine high nutritional value with strong environmental adaptability is essential for improving the performance of CELSS crop cultivation systems. In addition, the development of standardized experimental platforms and cultivation protocols is necessary to ensure the reliability and reproducibility of future experiments.

The present study represents a preliminary stage within a broader research program focused on supplementary crops for CELSS systems. The research integrates three key components: scientific crop selection, the design and construction of a specialized experimental device, and the development of a standardized cultivation experiment framework. By combining these elements, the study aims to provide methodological and technological support for future CELSS crop cultivation experiments and to establish a reliable basis for collecting accurate experimental data.

Based on more than forty years of international CELSS research and considering the 35 fundamental crop selection criteria proposed by NASA (Salisbury F.B., Clark M.A., 1996; Hoff J.E., Howe J.M., 1981; Zabel P., 2021), four key principles were formulated for selecting candidate crops suitable for CELSS environments.

The environmental and system function adaptation principle emphasizes the ability of crops to tolerate specific CELSS environmental conditions such as microgravity, elevated CO₂ concentrations (0.1–0.2%) and high humidity in closed systems. Crops should demonstrate high photosynthetic efficiency and strong CO₂ fixation capacity, while non-edible biomass should be easily recyclable through microbial decomposition or other ecological processes (Hoff J.E., Howe J.M., 1981).

The growth characteristic adaptation principle focuses on plant morphology and growth dynamics. Ideal CELSS crops should possess compact or dwarf plant architecture suitable for multilayer vertical cultivation systems, thereby improving spatial efficiency. In addition, crops should have growth cycles compatible with staged semi-continuous production systems, with leafy vegetables completing their cycle within approximately 40 days and medicinal-nutritional crops capable of long-term harvesting (Zabel P., 2021).

The nutritional supply adaptation principle requires crops to provide high nutritional density and compensate for deficiencies in existing CELSS crop systems. In particular, candidate crops should supply essential micronutrients, bioactive compounds and beneficial metabolites while also contributing to dietary diversity and astronaut health maintenance (Rose C.W., 1989).

Finally, the cultivation and management simplicity principle highlights the importance of crops that are compatible with hydroponic or substrate-based cultivation systems and can be managed through automated technologies. High microbial safety, stable genetic traits and the ability to support multiple generations of cultivation are also essential to ensure long-term system stability (Salisbury F.B., Clark M.A., 1996; Dong C. et al., 2015).

Based on these criteria and considering experimental feasibility, growth characteristics and nutritional potential, three candidate species were selected for further investigation: *Mesembryanthemum crystallinum* L., *Anredera cordifolia* (Ten.) Steenis and *Anoectochilus roxburghii* (Wall.) Lindl. These crops demonstrate promising environmental adaptability within CELSS conditions and possess complementary nutritional and functional properties. Their morphological characteristics, growth cycles, nutritional advantages and potential roles in CELSS crop systems are summarized in Table 1.

As shown in Table 1, the selected species differ in growth habit, cultivation cycle and functional value, which determines their complementary role in CELSS crop systems. *Mesembryanthemum crystallinum* L. exhibits a creeping dwarf growth habit (15–25 cm), which significantly improves vertical space utilization compared with traditional crops such as wheat and maize. Its tolerance to elevated CO₂ concentrations and saline environments may reduce the energy requirements associated with environmental regulation in CELSS systems.

Table 1. Characteristics and CELSS Adaptation Points of Three Test Crops

Crop	Plant Type Characteristics	Growth Cycle	Nutritional Advantages	CELSS Adaptation Key Points	Cultivation Features
 <i>Mesembryanthemum crystallinum</i> L. (Lee J.W. et al., 2016; Cha M.K., et al., 2014; Xia J., et al., 2021)	Dwarf and compact plant type, 15~25 cm, creeping growth	30~40 days	Rich in minerals such as sodium, potassium and calcium, high vitamin C content	Tolerant to 400 mM NaCl and high CO ₂ , transpiration can regulate cabin humidity, stable photosynthetic efficiency	All three crops can be cultivated by hydroponics, which is compatible with CELSS cultivation methods; cultivation method is simple.
 <i>Anredera cordifolia</i> (Ten.) Steenis (Bari I.N., et al., 2019; Silalahi M., 2024)	Dwarf and compact plant type, twining vine, plant height 20~30 cm and crown width 30~40 cm after artificial pruning	Propagated by bulbils/stem cuttings, harvestable in 30~40 days, one planting for multiple continuous harvests	Dry weight protein content 20~25% (higher than lettuce and spinach), high easily absorbable calcium, containing mucopolysaccharides and carotene	Tolerant to low light and high temperature, adapted to high CO ₂ closed environment; stable photosynthetic oxygen production, strong disease resistance, easy plant type regulation	
 <i>Anoectochilus roxburghii</i> (Wall.) Lindl (Chen M.X., et al., 2021; Dong Q., et al., 2022; Li H., et al., 2025)	Dwarf and compact plant type, plant height 10~15 cm, crown width 8~12 cm	6~8 months, one planting for continuous harvest for 2~3 years	Rich in bioactive components such as polysaccharides, flavonoids and alkaloids, medicine-food homologous	Shade-tolerant (50~150 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), tolerant to high humidity and high CO ₂ , aerial roots suitable for soilless cultivation, can alleviate the health problems of astronauts in closed environment	

Anredera cordifolia (Ten.) Steenis possesses a relatively high protein content of 20–25% in dry biomass, exceeding that of many commonly cultivated leafy vegetables such as lettuce or spinach. In addition, its capacity for repeated harvest from a single planting cycle supports continuous food supply. *Anoectochilus roxburghii* (Wall.) Lindl, a medicinal-nutritional plant rich in polysaccharides, flavonoids and other bioactive compounds, may help mitigate physiological stress associated with long-term closed environments experienced by astronauts.

Together, these three crops combine compact plant architecture with nutritional and functional diversity. When integrated with staple crops such as wheat and tomato, they may contribute to a CELSS crop cultivation system characterized by “basic nutrition + functional supplementation”, improving both the

Materials and Methods

The research was conducted as a phased 6–10 month ground simulation experiment aimed at assessing

efficiency and resilience of extraterrestrial agricultural systems.

Despite extensive studies on crop cultivation in CELSS systems, most research has focused on staple food crops such as wheat, lettuce and tomato. However, the selection of supplementary crops capable of improving nutritional diversity, ecological stability and functional value of the system remains insufficiently explored. In particular, the integration of crops providing functional bioactive compounds and high nutritional density has received limited attention in CELSS crop design. The aim of this study was to develop a methodological framework for the selection and experimental evaluation of supplementary crops suitable for Controlled Ecological Life Support Systems and to design a ground-based experimental platform for testing crop adaptability under simulated CELSS environmental conditions.

the adaptability of selected crops to a simulated Controlled Ecological Life Support System (CELSS). The experimental design was based on the principles of

single-factor comparison, parallel replication and quantitative evaluation. The study included three main stages: pretreatment of plant material, cultivation under controlled environmental conditions, and determination of growth, physiological and ecological indicators.

The objects of the study were *Mesembryanthemum crystallinum* L., dwarf strain of *Anredera cordifolia* (Ten.) Steenis, and *Anoectochilus roxburghii* (Wall.) Lindl. These species were selected as candidate crops for CELSS cultivation on the basis of their compact growth habit, nutritional value, ecological adaptability and compatibility with controlled-environment cultivation systems. For all crops, seeds or planting material with uniform size, full development and no visible symptoms of diseases or pest damage were selected to minimize experimental error.

The pretreatment of plant material was carried out according to the biological characteristics of each species. Seeds of *Mesembryanthemum crystallinum* L. were soaked in 75% ethanol for 15 s, disinfected in 0.1% potassium permanganate solution for 10 min, rinsed with sterile water 3–5 times, soaked in clean water for 2 h at room temperature, germinated in a moist chamber at 20°C, and transferred to hydroponic seedling cultivation after radicle emergence. For *Anredera cordifolia* (Ten.) Steenis, full bulbils or vigorous stem cuttings with two nodes were selected, air-dried at the incision site, disinfected in 0.1% carbendazim solution for 10 min, treated with rooting agent at the basal part, and fixed directly in hydroponic planting sponge. *Anoectochilus roxburghii* (Wall.) Lindl was subjected to aseptic pretreatment by immersion in 75% ethanol for 30 s, followed by disinfection in 2% sodium hypochlorite solution for 10 min, rinsing with sterile water 5–6 times, germination on sterile medium, seedling acclimatization for 15 days, and subsequent transfer to the hydroponic system.

A single-factor comparative experiment was established in which the cultivation environment was the only variable. The experimental group was cultivated under simulated CELSS conditions in a self-constructed Micro-Lunar Greenhouse System (MLGS), whereas the control group was cultivated under conventional laboratory conditions. All other parameters, including planting density, nutrient solution composition, cultivation method and management schedule, were maintained at comparable levels in both treatments. Each treatment included three biological replications, with 20 uniformly developed plants in each replication.

To simulate the core environmental parameters of CELSS, a Micro-Lunar Greenhouse System (MLGS) was designed and constructed. The device was developed as a compact, modular and relatively low-cost platform for precise environmental regulation, real-time monitoring and automated data collection (Abinaya M. et al., 2015; Morrow R.C. et al., 2016; Tang Y. et al., 2018; Miyajima H., 2020). The system consisted of a closed cultivation chamber with an internal volume of about 1.52 m³, built on a stainless-steel frame. The

chamber walls were made of double-layer acrylic panels with insulating materials to ensure both light transmission and thermal stability. Sampling ports, operation doors and observation windows were integrated into the structure for routine experimental procedures. The environmental regulation range and control accuracy of the MLGS device are presented in Table 2.

Compared with large-scale CELSS simulation facilities, the proposed MLGS system was designed specifically for single-factor crop cultivation experiments. In contrast to platforms limited mainly to light regulation, the MLGS allowed integrated control of atmospheric, light and nutrient conditions, including temperature, relative humidity, CO₂ and O₂ concentration, air flow, light intensity and spectral composition, nutrient solution properties and circulation of simulated waste liquid. The parameter settings were selected in accordance with the environmental requirements reported for CELSS crop cultivation (Hoff J.E., Howe J.M., 1981; Morrow R.C. et al., 2016; Fu Y., 2016). The device included four main modules: an environmental generation module, a perception and monitoring module, an intelligent control and data management module, and a crop cultivation module.

As presented in Table 2, the MLGS provides controlled regulation of atmospheric, light, substrate and circulating substance parameters required for simulated CELSS experiments. In the experimental treatment, the MLGS device was used for automatic and precise regulation of temperature, humidity, gas composition, light conditions, irrigation and nutrient supply. Since the selected crops differed substantially in their ecological and physiological requirements, differentiated cultivation regimes were established for each species. For *Mesembryanthemum crystallinum* L., the cultivation regime emphasized moderate temperature, relatively low humidity, elevated CO₂ concentration, hydroponic cultivation and modified Hoagland nutrient solution. For *Anredera cordifolia* (Ten.) Steenis, the cultivation conditions included higher temperature and humidity, moderate ventilation, long photoperiod and a high-nitrogen nutrient solution. For *Anoectochilus roxburghii* (Wall.) Lindl, the cultivation regime was adapted to shade-tolerant and humidity-demanding growth, with low light intensity, short photoperiod and diluted modified MS nutrient medium. The optimized cultivation parameters for the tested crops under MLGS conditions are summarized in Table 3.

According to the cultivation regimes summarized in Table 3, each crop required a differentiated combination of temperature, humidity, CO₂ concentration, light intensity and nutrient solution parameters. The control treatment was carried out in a conventional laboratory cultivation system using the same hydroponic method, planting density, cultivation tanks and general nutrient solution approach as in the experimental group. Environmental control in the control group was performed manually.

Table 2. Environmental Parameter Regulation Range and Accuracy of MLGS Device

Parameter Category	Indicator	Adjustable Range	Regulation Accuracy
Atmospheric environment (Dougher T.A. et al., 1997; Abinaya M. et al., 2015)	Temperature/°C	5~40	±1
	Relative humidity/%	35~90	±2
	CO ₂ concentration/μmol·mol ⁻¹	25~5000	±0.2
	O ₂ concentration/%	5~25	±5
	Air flow speed/(m/s)	0.1~1.0	±0.1
Light environment (Gómez C. et al., 2013; Berkovich Y.A., et al., 2019)	Light intensity/(μmol/(m ² ·s))	0~3000	-
	Photoperiod/h	0~24	-
	Spectral wavelength/nm	400~750	-
Cultivation substrate (Morrow R.C. et al., 2016; Tang Y. et al., 2008)	Root zone temperature/°C	5~40	±1
	pH	4.8~8.0	±0.2
	Electrical conductivity/(dS/m)	0.5~5.0	±0.5
	Dissolved oxygen concentration/(μmol/mol)	5~20	±2%
Circulating substances (Morrow R.C. et al., 2016; Fu Y. et al., 2016)	Simulated astronaut organic waste liquid	Waste liquid formula: urea 1.5 g/L, creatinine 0.15 g/L, uric acid 0.05 g/L, sodium chloride 5 g/L, potassium chloride 1 g/L, potassium dihydrogen phosphate 0.5 g/L, pH 7.0~7.5. Start adding 1 time a week according to 10% of the nutrient solution volume on the 15th day after crop planting	Same as the adjustable range

Table 3. Cultivation parameters of selected crops under MLGS conditions

Parameter category	Indicator	<i>Mesembryanthemum crystallinum</i> L.	<i>Anredera cordifolia</i> (Ten.) Steenis	<i>Anoectochilus roxburghii</i> (Wall.) Lindl
Atmospheric environment	Temperature (day/night), °C	20–25 / 15–18	25–30 / 20–22	23–25 / 18–20
	Relative humidity, %	40–60	60–80	70–85
	CO ₂ concentration, μmol mol ⁻¹	800–1200	1000–1500	600–800
	Air flow speed, m s ⁻¹	0.3–0.5	0.2–0.3	0.1–0.2
Light environment	Light quality	Red:Blue (3:1) + white	White + 10–15% red	Red:Blue (7:3) + weak white
	Light intensity, μmol m ⁻² s ⁻¹	150–180	200–300	50–150
	Photoperiod, h day ⁻¹	12–14	14–16	10–12
Cultivation management	Cultivation method	Hydroponics	Hydroponics	Hydroponics
	Nutrient solution pH	6.0–7.0	6.0–6.5	5.5–6.0
	Electrical conductivity (EC), μS cm ⁻¹	800–1500	1000–1400	500–800
	Planting density, plants m ⁻²	25	25	50
	Irrigation regime	10 min every 2 h circulation	15 min every 3 h circulation	3–4 spray cycles per day (5–10 min)
	Nutrient solution formula	Modified Hoagland solution	High nitrogen formula (N:P:K = 3:1:2)	Modified MS medium (¼–½ strength)

The nutrient solution EC, pH and dissolved oxygen concentration were measured once a week and adjusted as necessary; the solution was replaced weekly. The environmental parameters corresponded to standard indoor cultivation conditions (Abinaya M. et al., 2015; Gómez C. et al., 2013; Berkovich Y.A.,

et al., 2019). Light was provided by a fixed red-blue LED source (660/450 nm) at an intensity of 200 μmol m⁻² s⁻¹ with a 12 h photoperiod and light uniformity of at least 80%. The atmospheric conditions were maintained at 25 ± 2°C, 70 ± 5% relative humidity, and ambient CO₂ concentration of about 400 ppm. General

management practices in both treatments included weekly cleaning of cultivation systems, removal of senescent plant organs, regular sanitation of the cultivation environment and continuous recording of plant growth, cultivation operations and environmental deviations.

The assessment of crop performance included three groups of indicators: growth phenotype, physiological and biochemical characteristics, and environmental adaptation with material cycle efficiency. Growth phenotype indicators included plant height, crown width or creeping area, functional leaf area, fresh and dry biomass, root-shoot ratio, biomass accumulation rate, growth duration, harvest index, root length, root surface area, root volume, root tip number, and plant uniformity. These indicators were used to characterize the growth and morphological adaptability of the crops under different cultivation conditions.

Physiological and biochemical indicators included SPAD value, net photosynthetic rate (P_n), stomatal conductance (G_s), transpiration rate (T_r), intercellular CO_2 concentration (C_i), antioxidant enzyme activity, malondialdehyde content, vitamin C, soluble sugar, and crop-specific nutritional components. For *Mesembryanthemum crystallinum* L., the contents of sodium, potassium and calcium were determined; for *Anredera cordifolia* (Ten.) Steenis, soluble protein and fatty acid composition were analyzed; and for *Anoectochilus roxburghii* (Wall.) Lindl., polysaccharides, flavonoids and alkaloids were quantified. Microbial safety was evaluated at harvest stage using high-throughput sequencing to assess the microbial diversity on the crop surface and the proportion of beneficial and potentially pathogenic microorganisms.

The environmental adaptation and material cycle assessment focused on the core CELSS functions, namely efficient resource utilization and system closure. The degradation rate of crop residues and simulated waste liquid, nitrogen and phosphorus cycle efficiency, viable microbial count in the nutrient solution, water use efficiency, salt use efficiency, CO_2 fixation efficiency, nutrient solution stability and system safety indicators were determined. Additional analyses included the composition of plant volatiles and root exudates, heavy metal accumulation and the ability of crops to tolerate and utilize simulated human and plant-derived wastes.

Statistical analysis of experimental data was performed using SPSS 26.0. One-way analysis of variance (ANOVA) was used to determine the significance of differences between treatments. Differences were considered significant at $P < 0.05$ and highly significant at $P < 0.01$. In the subsequent stage of the research, the analytic hierarchy process (AHP) combined with the entropy weight method will be used to determine the relative weight of each indicator and to construct an objective evaluation system for screening CELSS supplementary crops

Results and Discussion

The main objective of CELSS crop cultivation research is to ensure the in-situ production of food in extraterrestrial environments while maintaining environmental adaptability, balanced nutritional supply and efficient material circulation. Most existing studies have focused on the cultivation verification of traditional food and vegetable crops. However, the selection and experimental justification of supplementary crops remain critical for overcoming the functional limitations of current CELSS crop systems and improving the overall adaptability and stability of the system (Carillo P., 2020; Miyajima H., 2020).

Based on the analysis of the limitations of existing CELSS crops, the present study summarized standardized crop selection principles and indicators and proposed three candidate supplementary crops: *Mesembryanthemum crystallinum* L., *Anredera cordifolia* (Ten.) Steenis and *Anoectochilus roxburghii* (Wall.) Lindl. These crops were selected considering their compact morphology, high nutritional value, functional bioactive compounds and potential adaptability to controlled ecological environments.

The three species represent different functional roles within a potential CELSS crop system. *Mesembryanthemum crystallinum* is characterized by high salt tolerance, efficient CO_2 assimilation and compact plant architecture, which may improve space utilization efficiency in closed cultivation systems. *Anredera cordifolia* demonstrates relatively high protein content and rapid vegetative growth, contributing to the diversification of protein sources within CELSS crop production systems. *Anoectochilus roxburghii* is a medicinal-nutritional plant rich in bioactive compounds such as polysaccharides and flavonoids, which may contribute to maintaining astronaut physiological health under long-term closed environmental conditions.

The three species represent different functional roles within a potential CELSS crop system. *Mesembryanthemum crystallinum* is characterized by high salt tolerance and efficient CO_2 assimilation, *Anredera cordifolia* provides a high-protein biomass source, while *Anoectochilus roxburghii* contains medicinal bioactive compounds that may support astronaut health. The conceptual integration of supplementary crops within the CELSS framework, including their interaction with atmospheric regulation and nutrient cycling modules, is illustrated in Figure 1.

Figure 1 presents a conceptual model of the integration of supplementary crops into the CELSS system. In contrast to traditional crop configurations focused mainly on staple food production, the proposed structure incorporates functionally differentiated plant groups that contribute to system stability and nutritional diversity. Basic crops such as wheat and tomato provide primary biomass production, while supplementary crops perform specialized roles: *Mesembryanthemum crystallinum* contributes to

mineral and physiological regulation, *Anredera cordifolia* serves as a protein-rich biomass source, and

Anoectochilus roxburghii provides bioactive compounds with potential health-supporting functions.

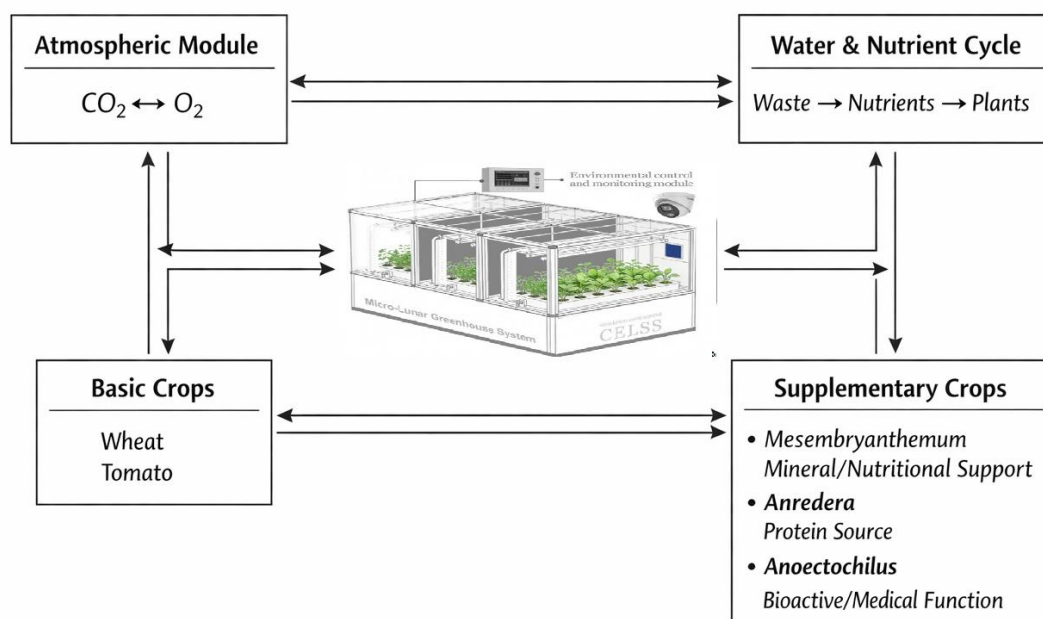


Figure 1. Conceptual integration of supplementary crops within a Controlled Ecological Life Support System (CELSS)

The integration of these crops within atmospheric and nutrient cycling modules enhances overall system efficiency, resilience and functional completeness. This approach represents a shift from conventional CELSS crop systems toward a functionally diversified and resilience-oriented design.

These characteristics indicate that the selected crops can complement traditional CELSS crops such as wheat, lettuce and tomato by providing additional nutritional components, improving ecological system stability and increasing functional diversity within extraterrestrial agricultural systems (Miyajima H., 2020; Gale J. et al., 1989).

Environmental adaptability and cultivation potential of selected crops. The environmental adaptability of the selected crops was evaluated based on their physiological requirements, morphological characteristics and compatibility with controlled-environment cultivation systems. All three crops possess relatively compact growth habits and moderate biomass accumulation rates, making them suitable for multilayer cultivation systems commonly proposed for extraterrestrial agriculture.

In particular, *Mesembryanthemum crystallinum* demonstrates strong tolerance to saline and high CO₂ environments, which may reduce the operational burden of atmospheric and nutrient solution regulation within CELSS. *Anredera cordifolia* shows vigorous vegetative growth and continuous harvest potential, which supports stable food supply in long-duration missions. *Anoectochilus roxburghii*, although requiring relatively specific environmental conditions,

has high medicinal value and could provide additional health benefits in long-term space habitation scenarios.

The cultivation parameters determined in the present study indicate that the selected crops can be successfully integrated into controlled hydroponic systems and managed under regulated environmental conditions provided by the MLGS experimental platform.

Evaluation of the MLGS experimental platform. The Micro-Lunar Greenhouse System (MLGS) developed in this study provides a compact and flexible experimental platform capable of simulating key CELSS environmental parameters. Compared with large-scale CELSS simulation facilities, the MLGS system offers advantages in terms of modular structure, cost efficiency and experimental controllability.

The device enables precise regulation and monitoring of environmental factors such as temperature, humidity, atmospheric composition, light conditions and nutrient solution parameters. This integrated environmental control allows for the simulation of key CELSS conditions, including elevated CO₂ concentrations and closed ecological environments. The modular design also enables independent cultivation zones for different crop species, which facilitates comparative experiments and parameter optimization.

The use of such compact experimental systems is particularly important for the development of standardized ground simulation experiments in controlled-environment agriculture and space crop research.

Scientific significance of the proposed crop selection strategy. The crop selection strategy proposed in this study integrates multiple criteria including environmental adaptability, nutritional value, functional bioactive components and cultivation feasibility. Compared with traditional crop selection approaches focusing mainly on yield and basic nutrition, the proposed approach emphasizes multifunctional crop roles within a closed ecological system.

The three selected crops represent complementary functional groups: nutritional supplementation crops (*Mesembryanthemum crystallinum*), high-protein biomass crops (*Anredera cordifolia*) and medicinal-functional crops (*Anoectochilus roxburghii*). The integration of these species with traditional staple crops could contribute to the development of a more balanced and resilient CELSS crop cultivation system.

Furthermore, the standardized experimental framework developed in this study provides a methodological basis for future research aimed at evaluating the adaptability and productivity of candidate crops under simulated extraterrestrial conditions.

Scientific and practical implications. The results of this study contribute both theoretical and practical insights to CELSS crop research. From a

Conclusions

The present study proposed a systematic framework for the selection and experimental evaluation of supplementary crops for Controlled Ecological Life Support Systems (CELSS). Based on an analysis of the limitations of currently used CELSS crops, a set of standardized selection criteria integrating environmental adaptability, nutritional value, cultivation feasibility and system compatibility was formulated.

Using these criteria, three candidate crops – *Mesembryanthemum crystallinum* L., *Anredera cordifolia* (Ten.) Steenis and *Anoectochilus roxburghii* (Wall.) Lindl – were identified as promising supplementary species for CELSS crop systems. The selected crops represent complementary functional groups within a potential extraterrestrial agricultural system, including nutritional supplementation, high-protein biomass production and medicinal-functional regulation.

A compact ground simulation platform, the Micro-Lunar Greenhouse System (MLGS), was designed and constructed to reproduce the key

theoretical perspective, the study expands the range of candidate crops considered for extraterrestrial agriculture and proposes a systematic framework for evaluating supplementary crops in closed ecological systems.

From a practical perspective, the MLGS experimental platform and the standardized cultivation protocol developed in this research provide a scalable and reproducible approach for conducting ground-based CELSS crop experiments. Such systems may support further investigations into crop adaptability under simulated space environmental conditions and facilitate the preparation of future on-orbit plant cultivation experiments.

Overall, the integration of innovative crop selection strategies with modular experimental systems represents an important step toward the development of sustainable agricultural systems for long-duration space exploration missions.

The present study represents a conceptual and methodological stage of a broader research project. The formal cultivation experiments and quantitative data analysis are planned for subsequent research phases. Therefore, the conclusions of this study primarily relate to the methodological framework and experimental system design rather than to final crop performance evaluation.

environmental parameters of CELSS. The modular structure of the device enables precise environmental regulation, real-time monitoring and standardized experimental operation, providing a reliable platform for controlled crop cultivation experiments.

In addition, a standardized cultivation experiment scheme was developed, including pretreatment procedures for plant material, environmental control parameters, cultivation management protocols and a multi-dimensional system of evaluation indicators. The proposed experimental framework ensures the scientific validity, repeatability and comparability of subsequent experiments.

The results of this study provide a methodological and technological foundation for further experimental verification of crop adaptability under simulated CELSS conditions. The proposed crop selection strategy and experimental system may contribute to the development of diversified crop cultivation systems capable of supporting sustainable food production for long-duration extraterrestrial missions.

References

- Abe Koichi, Ishikawa Yoshio, Kibe Seishiro, Nitta Keiji. (2005). Simulation model for the closed plant experiment facility of CEEF. *Advances in Space Research*. 35(9). P. 1597–1608. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.06.067> (In English).
- Abinaya M., Prabhakaran S., Nur H., et al. (2015). Blue LED light enhances growth,

phytochemical contents, and antioxidant enzyme activities of *Rehmannia glutinosa* in vitro. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*. 56. P. 105–113. <https://doi.org/10.1007/s13580-015-0114-1> (In English).

Bakumenko O., Tao W., Vlasenko V. (2026). Adaptation of agricultural crops to compound stresses

in a simulated greenhouse environment. *Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference*. Lyon. P. 11–15. (In English).

Bari I. N., Kato-Noguchi H., Iwasaki A., et al. (2019). Allelopathic potency and an active substance from *Anredera cordifolia* (Tenore) Steenis. *Plants*. 8(5). P. 134. <https://doi.org/10.3390/plants8050134> (In English).

Berkovich Y. A., et al. (2019). LED lighting optimization as applied to a vitamin space plant growth facility. *Life Sciences in Space Research*. 20. P. 93–100. r S., Rouphael Y. (2020). Challenges for a sustainable food production system on board the International Space Station: A technical review. *Agronomy*. 10(5). P. 687. <https://doi.org/10.3390/agronomy10050687> (In English).

Cha M. K., et al. (2014). Growth model of common ice plant using expolinear functions in a closed-type plant production system. *Korean Journal of Horticultural Science and Technology*. 32(3). P. 327–335. <https://doi.org/10.7235/HORT.2014.14013> (In English).

Chen M. X., et al. (2021). An orthogonal design of light factors to optimize growth, photosynthetic capability and metabolite accumulation of *Anoectochilus roxburghii*. *Scientia Horticulturae*. 288. P. 110272. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110272> (In English).

Dong C., Shao L., Yu M., et al. (2015). Evaluation of wheat growth, morphological characteristics, biomass yield and quality in Lunar Palace-1, plant factory, greenhouse and field systems. *Acta Astronautica*. 111. P. 102–109. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2015.02.021> (In English).

Dong Q., et al. (2022). Effects of silicon on vegetative growth and accumulation of major active components in *Anoectochilus roxburghii*. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*. 37(6). P. 734–740. <https://doi.org/10.19303/j.issn.1008-0384.2022.06.007> (In Chinese).

Dougher T. A., Bugbee B. (1997). Effect of lamp type and temperature on development, carbon partitioning and yield of soybean. *Advances in Space Research*. 20(10). P. 1895–1899. (In English).

Fu Y., Li L., Xie B., et al. (2016). How to establish a bioregenerative life support system for long-term crewed missions to the Moon or Mars. *Astrobiology*. 16(12). P. 925–936. <https://doi.org/10.1089/ast.2016.1477> (In English).

Gale J., Smernoff D. T., Macler B. A., MacElroy R. D. (1989). Carbon balance and productivity of *Lemna gibba*, a candidate plant for CELSS. *Advances in Space Research*. 9(8). P. 43–52. [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(89\)90027-6](https://doi.org/10.1016/0273-1177(89)90027-6) (In English).

Gómez C., Morrow R. C., Bourget C. M., Massa G. D., Mitchell C. A. (2013). Comparison of LED and

HPS lighting for greenhouse crops. *HortTechnology*. 23(1). P. 93–98. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH.23.1.93> (In English).

Hendrickx L., De Wever H., Hermans V., et al. (2006). Microbial ecology of the MELiSSA life support system. *Advances in Space Research*. 38. P. 111–117. (In English).

Hoff J. E., Howe J. M. (1981). Development of selection criteria and their application in evaluation of CELSS candidate species. *Life Support System Conference*. NASA. (In English).

Lasseur C., et al. (1996). MELiSSA: A potential experiment for a precursor mission to the Moon. *Advances in Space Research*. 18(11). P. 111–117. [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(96\)00097-X](https://doi.org/10.1016/0273-1177(96)00097-X) (In English).

Lee J. W., et al. (2016). Growth and phytochemical contents of ice plant as affected by light quality in a closed-type plant production system. *Korean Journal of Horticultural Science and Technology*. 34(6). P. 878–885. <https://doi.org/10.12972/kjhst.20160092> (In English).

Li H., et al. (2025). Effects of high temperature stress on carbohydrate metabolism in *Anoectochilus roxburghii*. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*. 40(9). P. 933–941. <https://doi.org/10.19303/j.issn.1008-0384.2025.09.009> (In Chinese).

Mitchell C. A. (1994). Bioregenerative life-support systems. *The American Journal of Clinical Nutrition*. 60(5 Suppl). P. 820S–824S. <https://doi.org/10.1093/ajcn/60.5.820S> (In English).

Miyajima H. (2020). Self-sustainable life support system trade study for lunar farming. *International Journal of Microgravity Science and Application*. 37(3). P. 370304. <https://doi.org/10.15011/ijmsa.37.3.370304> (In English).

Morrow R. C., Richter R. C., Tellez G., et al. (2016). A new plant habitat facility for the ISS. *Proceedings of the 6th International Conference on Environmental Systems*. AIAA. <http://hdl.handle.net/2346/67664> (In English).

Morrow R. C., Wetzel J. P., Richter R. C., et al. (2017). Evolution of space-based plant growth technologies for hybrid life support systems. *Proceedings of the 47th International Conference on Environmental Systems*. AIAA. <http://hdl.handle.net/2346/73075> (In English).

Nitta K., et al. (2001). The CEEF, closed ecosystem as a laboratory for determining the dynamics of radioactive isotopes. *Advances in Space Research*. 27(9). P. 1505–1512. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(01\)00242-3](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(01)00242-3) (In English).

Rodriguez-Hernandez M. C., et al. (2022). Only low saline conditions benefited yield and quality of ice plant grown in pot culture. *Journal of Applied Botany and Food Quality*. 95. P. 17–22.

<https://doi.org/10.5073/jabfq.2022.095.003> (In English).

Rose C. W. (1989). Nutritional models for a controlled ecological life support system (CELSS): Linear mathematical modeling. NASA Contractor Report 4229. (In English).

Salisbury F. B., Clark M. A. (1996). Choosing plants to be grown in a controlled environment life support system (CELSS) based upon attractive vegetarian diets. *Life Support & Biosphere Science*. 2(3–4). P. 169–179. (In English).

Silalahi M. (2024). Utilization and bioactivity of *Anredera cordifolia* (Ten.) Steenis. *GSC Biological and Pharmaceutical Sciences*. 26(2). P. 128–134. <https://doi.org/10.30574/gscbps.2024.26.2.0020> (In English).

Tang Y., Wang J., Zhang H., et al. (2008). Development of a CELSS experimental facility. *Advances in Space Research*. 41(5). P. 725–729. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2007.09.029> (In English).

Verbeelen T., Leys N., Ganigué R., Mastroleo F. (2021). Development of nitrogen recycling strategies for bioregenerative life support systems in space. *Frontiers in Microbiology*. 12. P. 700810. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.700810> (In English).

Wheeler R. M. (2017). Agriculture for space: People and places paving the way. *Open Agriculture*. 2(1). P. 14–32. <https://doi.org/10.1515/opag-2017-0002> (In English).

Xia J., et al. (2021). Sensory evaluation of common ice plant in response to sodium chloride concentration in hydroponic nutrient solution. *Foods*. 11(18). P. 2790. <https://doi.org/10.3390/foods11182790> (In English).

Zabel P. (2021). Influence of crop cultivation conditions on space greenhouse equivalent system mass. *CEAS Space Journal*. 13. P. 3–15. <https://doi.org/10.1007/s12567-020-00317-5> (In English).

ВІДБІР ВИСОКОАДАПТИВНИХ РОСЛИННИХ КУЛЬТУР ДЛЯ КЕРОВАНИХ ЕКОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ ЖИТТЄЗАБЕЗПЕЧЕННЯ В УМОВАХ МОДЕЛЬОВАНОГО СЕРЕДОВИЩА

Wei TAO^{1,2}, ORCID: 0009-0001-4843-9018

Ольга БАКУМЕНКО¹, ORCID: 0000-0003-1625-7401

Оксана ДАЦЬКО¹, ORCID: 0000-0001-9610-3087

¹Сумський національний аграрний університет, вул. Герасима Кондратьєва, 160, м. Суми, 40021, Україна

²Shandong Agriculture and Engineering University, м. Цзінань, провінція Шаньдун, Китайська Народна Республіка
e-mail: lady.bakumenko88@gmail.com

Розвиток технологій вирощування рослин у контрольованих середовищах потребує пошуку видів, здатних ефективно функціонувати в замкнених або напівзамкнених екологічних системах із обмеженими ресурсами. Одним із перспективних напрямів таких досліджень є використання керованих екологічних систем життєзабезпечення (Controlled Ecological Life Support Systems, CELSS), у яких рослини забезпечують регенерацію газового середовища, беруть участь у водному та біогеохімічних циклах і формують харчову продукцію. Метою роботи є обґрунтування підходів до відбору рослинних культур із високим адаптаційним потенціалом для вирощування в контрольованих умовах та розроблення експериментальної платформи для дослідження їх росту і функціонування. На основі аналізу наукових джерел сформульовано принципи відбору перспективних культур з урахуванням екологічної адаптивності, морфологічних характеристик, поживної цінності та технологічної придатності до вирощування у регульованому середовищі. Як кандидатні види запропоновано *Mesembryanthemum crystallinum* L., *Anredera cordifolia* (Ten.) Steenis та *Anoectochilus roxburghii* (Wall.) Lindl., які характеризуються компактною морфологією, високим вмістом поживних і біологічно активних речовин та потенційною придатністю до вирощування в умовах обмеженого простору. Для дослідження їх адаптаційного потенціалу розроблено експериментальну установку Micro-Lunar Greenhouse System (MLGS), що забезпечує моделювання основних параметрів контрольованого середовища, зокрема температури, вологості, газового складу атмосфери, освітлення та параметрів живильного розчину. Запропоновано стандартизовану схему культивативного експерименту та систему оцінювання морфологічних, фізіолого-біохімічних і ресурсоефективних показників рослин. Отримані результати формують методологічну основу для подальших досліджень адаптації рослин у контрольованих екологічних системах та можуть бути використані під час розроблення технологій вирощування культур у замкнених середовищах.

Ключові слова: керовані екологічні системи життєзабезпечення, CELSS, контрольоване середовище вирощування, відбір рослинних культур, адаптація рослин, замкнені екологічні системи, Micro-Lunar Greenhouse System, модельоване середовище

This is an open-access article under the terms of the Creative Commons

Отримано: 21.3.2026

Погоджено до друку: 18.8.2026

Опубліковано: 30.9.2026

Наукова діяльність

ТВАРИННИЦТВО

© Й. Ф. Рівіс, І. І. Саранчук, О. Я. Клим, О. О. Безалтична, О. І. Стадницька, А. В. Шелевач, О. О. Гопаненко, В. Б. Тодорюк, 2026

УДК 638.1.638.124.577.12.546.3

DOI: 10.32636/agroscience.2026-(5)-3-10

ОСОБЛИВОСТІ НАГРОМАДЖЕННЯ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ
У ТКАНИНАХ МЕДОНОСНИХ БДЖІЛ І БДЖОЛИНІЙ ПРОДУКЦІЇ

Йосип РІВІС¹, доктор сільськогосподарських наук, ORCID: 0000-0002-6249-3440
Іван САРАНЧУК², кандидат сільськогосподарських наук, ORCID: 0000-0003-4695-7804
Олег КЛИМ¹, кандидат сільськогосподарських наук, ORCID: 0000-0002-6330-8489
Олена БЕЗАЛТИЧНА⁵, кандидат сільськогосподарських наук, ORCID: 0000-0002-4257-0699
Ольга СТАДНИЦЬКА¹, кандидат сільськогосподарських наук, ORCID: 0000-0001-6574-4068
Андрій ШЕЛЕВАЧ¹, кандидат сільськогосподарських наук, ORCID: 0000-0002-7202-0911
Ольга ГОПАНЕНКО³, кандидат біологічних наук, ORCID: 0000-0003-0842-0248
Василь ТОДОРЮК⁴, кандидат ветеринарних наук, ORCID: 0000-0002-9902-0524

¹Інститут сільського господарства Карпатського регіону НААН; ²Буковинська державна дослідна станція,

³Львівська медична академія імені Андрея Крупинського; ⁴Інститут біології тварин НААН

⁵Одеський державний аграрний університет, Україна

e-mail: rivisjf@mail.com

Актуальність запропонованої роботи полягає в наступному. Джерела емісії важких металів і шляхи їх надходження в навколишнє середовище відрізняються різноманітністю, але загалом вони мають техногенне походження як наслідок урбанізації та індустріалізації. Урбанізація та індустріалізація, зокрема діяльність промисловості, сільського господарства, енергетики й транспорту, а також інтенсивне видобування корисних копалин – все це призвело до надходження у повітря, воду, ґрунт і рослини важких металів, у тому числі високотоксичних (Плюмбуму, Кадмію й Арсену).

Піддослідні пасіки клінічно здорових медоносних бджіл породи карпатська (*Apis mellifera* (L.) *carpatica*), були підібрані на базі приватних пасічних господарств гірської (сmt. Славсько, Стрийського району), передгірної (с. Нижня Стинава, Стрийського району) та лісостепової (с. Миклашів, Львівського району) зон Львівської обл.

Для оцінки інтенсивності техногенного навантаження на довкілля, де знаходяться піддослідні пасіки медоносних бджіл, визначався вміст важких металів у бджолиному обніжжі, тканинах медоносних бджіл, свіжопобудованих бджолиних стільниках (язиках) і натуральних поліфлорних медах. Крім того, в кожній з наведених вище природних зон Карпатського регіону на кожній з трьох пасік у трьох вуликах на початку літнього періоду впродовж 36 днів щодванадцятий день досліджувалася інтенсивність яйцекладки бджолиних маток. Для цього використовувалися вимірювальні рамки.

Встановлено, що в бджолиному обніжжі, яке є основним кормом для бджіл, передгірної та лісостепової зон Карпатського регіону, порівняно з умовно чистою гірською зоною, є більший вміст важких металів. Із наведеної вище таблиці також видно, що в бджолиному обніжжі лісостепової зони Карпатського регіону міститься найвищий рівень досліджуваних важких металів. При цьому вміст токсичних елементів Плюмбуму і Кадмію в бджолиному обніжжі в наведеній вище зоні є в 1,1 рази більшим за гранично допустиму концентрацію.

Встановлено також, що високий рівень важких металів у бджолиному обніжжі є причиною зростання їх вмісту в бджолиній продукції. Зокрема, в свіжопобудованих бджолиних стільниках (язиках) передгірної й особливо лісостепової зон, порівняно з умовно чистим гірським довкіллям, зростає вміст Плюмбуму (відповідно в 1,52 і 2,24 рази) та Кадмію (відповідно в 2,00 і 3,50 рази). При цьому концентрація Хрому збільшується відповідно в 1,40 і 1,60 рази.

Ключові слова: важкі метали, бджоли, навколишнє середовище, рослини, бджолина продукція.

Стаття з відкритим доступом на умовах ліцензії Creative Commons

Вступ

В умовах сучасного землеробства хвороби качанів Міграція важких металів в об'єктах зовнішнього середовища спричинила нагромадження їх у рослинах (Mărgăoan R., Özkök A., Keskin Ş., Mayda N., Urcan A. C., Cornea-Cipcigan M., 2021) Як наслідок, одні види рослин поступилися місцем іншим і змінилися строки їх цвітіння, та тим самим умови збору бджолами нектару й обніжжя (Hsu P.-S., Wu T.-H., Huang M.-Y., Wang D.-Y., Wu M.-C., 2021).

Наведене вище призвело також до накопичення важких металів у тканинах медоносних бджіл і продуктах бджільництва (Mărgăoan R., Özkök A., Keskin Ş., Mayda N., Urcan A. C., Cornea-Cipcigan M., 2021; Takic M., Zekovic M., Terzic B., Stojasavljevic A., Mijuskovic M., Radjen S., Ristic-Medic D. 2021 Тому актуальним є питання виробництва екологічно безпечних продуктів бджільництва. Тим більше, що продукція медоносних бджіл займає чільне місце в

життєдіяльності людини (Hsu P.-S., Wu T.-H., Huang M.-Y., Wang D.-Y., Wu M.-C., 2021).

До якісних показників продукції медоносних бджіл ставляться дуже високі вимоги, оскільки на даний час Україна стала основним експортером медів в Європу.

У літературі є тільки фрагментарні дані щодо вмісту важких металів у тканинах медоносних бджіл і продукції бджіл, які утримуються в різних природних зонах Карпатського регіону (Klym O., Stadnytska O., 2019)

З огляду на наведене вище значний науково-практичний інтерес становлять дослідження вмісту важких металів, у тому числі токсичних, у тканинах медоносних бджіл і бджолиній продукції та з'ясування інтенсивності яйцекладки бджолиних маток і льотно-збиральної щодо обніжжя (пилку), воскової й медової продуктивності робочих бджіл у різних природних зонах Карпатського регіону.

Матеріали і методи

Піддослідні пасіки клінічно здорових медоносних бджіл породи карпатська (*Apis mellifera* (L) *carpatica*), були підібрані на базі приватних пасічних господарств гірської (с.мт. Славсько, Стрийського району), передгірної (с. Нижня Стинава, Стрийського району) та лісостепової (с. Миклашів, Львівського району) зон Львівської області.

Для оцінки інтенсивності техногенного навантаження на довкілля, де знаходяться піддослідні пасіки медоносних бджіл, визначався вміст важких металів у бджолиному обніжжі, тканинах медоносних бджіл, свіжопобудованих бджолиних стільниках (язиках) і натуральних поліфлорних медах.

На початку літнього періоду в кожній з наведених вище природних зон Карпатського регіону на кожній з трьох пасік із трьох вуликів для лабораторних досліджень загальноприйнятими методами відбирались зразки бджолиного обніжжя, тканин черевця медоносних бджіл, свіжопобудованих бджолиних стільників. Крім того, в кожній з наведених вище природних зон Карпатського регіону на кожній з трьох пасік у трьох вуликах на початку літнього періоду впродовж 36 днів щодванадцятий день досліджувалася інтенсивність яйцекладки бджолиних маток. Для цього використовувалися вимірні рамки.

Впродовж літнього періоду в кожній з наведених вище природних зон Карпатського регіону на кожній з трьох пасік у п'яти вуликах шляхом відкачування медових рамок досліджувалась медова продуктивність бджолосімей. Одночасно для лабораторних досліджень відбирались зразки натуральних поліфлорних медів.

У відібраних зразках бджолиного обніжжя, тканин черевця бджіл, свіжопобудованих бджолиних стільників (язиків) і поліфлорних медів

визначався вміст важких металів Феруму, Цинку, Купруму, Кобальту, Ніколу, Хрому, Плюмбуму та Кадмію на атомно-абсорбційному спектрофотометрі (Селмі-115) за В. В. Влізлом та ін. (Vlizlo V. V. et al., 2012).

Отриманий цифровий матеріал опрацьовано методом варіаційної статистики з використанням критерію Стюдента (Ібатуллин І. І., Жукорський О. М. 2017). Виразовувалися середні арифметичні величини (М) та похибки середніх арифметичних ($\pm m$). Різниці вважалися вірогідними за $p < 0,05$. Для розрахунків використана комп'ютерна програма Origin 6.0, Microsoft Excel.

Результати та обговорення

Стан довкілля на об'єктах дослідження контрольної гірської зони, що розташована біля с.мт. Славське, Стрийського району, за шестиступеневою шкалою загальної забрудненості навколишнього середовища в Україні вважається умовно чистим (1 ступінь) (Zastavnyi F., 2011). На цій території власних промислових викидів найменше. Стан довкілля дослідної передгірної зони (с. Нижня Стинава, Стрийський район) характеризується помірним забрудненням (2 ступінь). Дослідна лісостепова зона (с. Миклашів, Львівський район) знаходиться в забрудненій (3 ступінь) зоні, яка межує з дуже забрудненою (4 ступінь).

Оцінка здійснена на основі дослідження сумарної забрудненості ґрунтів за валовими формами Феруму, Цинку, Купруму, Кобальту, Ніколу, Хрому, Плюмбуму та Кадмію показує наступне (Статистичний довідник, 2013).

Контрольна гірська територія, для якої характерні бурі гірсько-лісові щебенюваті і дерново-буроземні ґрунти, знаходиться у відносно сприятливій зоні. Дослідна передгірна територія з дерново-підзолистими і дерновими опідзоленими, переважно поверхнево-оглеєними ґрунтами, розміщена на межі відносно сприятливої та помірно забрудненої зон. Дослідна лісостепова територія, для якої характерні дерново-підзолисті та дерново опідзолені, переважно поверхнево-оглеєні ґрунти, розташована на межі забрудненої та дуже забрудненої зон.

Для з'ясування сучасного стану рослинного покриву здійснено аналіз структури земель. Останній показав, що дотепер лісові угіддя біля с.мт. Славське Стрийського району, порівняно зі територією біля с. Нижня Стинава Стрийського району і с. Миклашів Львівського району, становлять найбільшу частку земель (Environment. Statistical information, 2013). Проте, власне, ліси займають лише 63% території від загальної площі териорії. Це означає, що певна частка лісових земель не зайняті деревостаном, а в кращому випадку чагарниками або пустищами. Екофункції цього покриву сприятливі для медозбору (Kryvyi M. M., Zhukovets O. I., Dikhtiar O. O., 2018).

Територія біля с. Нижня Стинава Стрийського району, де панують лучні угіддя,

прилягає до сильно знелісненої зони на межі території біля смт. Славсько Стрийського району. Екосистеми території біля с. Миклашів Львівського району переважно рілні, з невеликою часткою перелогів та лучних угідь, лісові практично відсутні.

Територія біля смт. Славсько Стрийського району освоєна під сільськогосподарські угіддя значно менше, ніж біля с. Нижня Стинава Стрийського і с. Миклашів Львівського районів (Статистична інформація, 2013). У ньому їх лише 24,8%. Рілля становить 6,9% від площі території району. Сукупно 17,7% займають лучні угіддя, 0,29% – сади.

На сільськогосподарських землях під непродуктивні площі відійшло трохи більше, ніж піввідсотка території. Це, як правило, оселища різнотрав'я. Загалом, підсумовуючи аналіз структури рослинного покриву, бачимо, що розораність угідь гірської зони становить 7-8%, передгірної – 40-46, лісостепової – 85-92%.

Таким чином стан екобезпеки в Карпатському регіоні, за шестиступеневою шкалою загальної забрудненості навколишнього середовища, характеризується наступним чином. Гірська екосистема розташована у Карпатській фізико-географічній місцевості в умовно чистій (1 ступінь) зоні, передгірна – у Передкарпатській височинній області в помірно забрудненій зоні (2

ступінь), а лісостепова – у Західному Лісостепі в забрудненій (3 ступінь) зоні, яка межує з дуже забрудненою (4 ступінь).

Отже, території, на котрих вибрані пасіки для дослідження впливу якості природного довкілля на чистоту продукції бджільництва, представляють усі зони забруднення Карпатського регіону та цілком відображають екоситуацію в Західній Україні.

Встановлено, що в бджолиному обніжжі, яке є основним кормом для бджіл, передгірної та лісостепової зон Карпатського регіону, порівняно з умовно чистою гірською зоною, є більший вміст важких металів (табл. 1). Із наведеної вище таблиці також видно, що в бджолиному обніжжі лісостепової зони Карпатського регіону міститься найвищий рівень досліджуваних важких металів.

При цьому вміст токсичних Плюмбуму і Кадмію в бджолиному обніжжі в наведеній вище зоні є в 1,1 рази більшим за гранично допустиму концентрацію. Вважається, що високий рівень Плюмбуму в орному шарі ґрунту і як наслідок в бджолиному обніжжі зумовлений рухом автотранспорту (Razanov S. F., Didur I. M., Pervachuk M. V., 2015), а Кадмію – з внесенням в ґрунт меліорантів і мінеральних добрив, зокрема фосфорітису та суперфосфату відповідно (Razanov S. F., Didur I. M., Pervachuk M. V., 2015; Vozhehova R. A., Vlashchuk A.M., Drobit O. S. 2021).

Таблиця 1. Вміст важких металів, у тому числі токсичних, у бджолиному обніжжі в різних природних зонах Карпатського регіону, $\text{г} \cdot 10^{-3} / \text{кг}$ сирової маси ($M \pm m$, $n=3$)

Метал та його символ	Природні зони Карпатського регіону		
	Гірська	Передгірна	Лісостепова
Ферум, Fe	33,52 $\pm$ 0,830	37,11 $\pm$ 0,781*	43,39 $\pm$ 2,253**
Цинк, Zn	34,39 $\pm$ 1,91	39,20 $\pm$ 0,900*	42,72 $\pm$ 0,872**
Купрум, Cu	2,01 $\pm$ 0,089	3,02 $\pm$ 0,169*	4,20 $\pm$ 0,170***
Кобальт, Co	1,01 $\pm$ 0,029	1,14 $\pm$ 0,050*	1,44 $\pm$ 0,112***
Хром, Cr	4,10 $\pm$ 0,177	5,02 $\pm$ 0,180*	6,68 $\pm$ 0,149***
Нікол, Ni	0,58 $\pm$ 0,015	0,65 $\pm$ 0,015*	0,74 $\pm$ 0,023**
Плюмбум, Pb	0,13 $\pm$ 0,007	0,16 $\pm$ 0,009*	0,21 $\pm$ 0,012**
Кадмій, Cd	0,04 $\pm$ 0,003	0,07 $\pm$ 0,007*	0,10 $\pm$ 0,009**

Примітка. Тут і далі. Різниці вірогідні порівняно з гірською зоною: * – $p < 0,05-0,02$; ** – $p < 0,01$; *** – $p < 0,001$.

Отримані дані характеризують рівень техногенного забруднення довкілля на піддослідних територіях. Високий рівень важких металів у повітрі, ґрунтових водах і ґрунтах є причиною зростання їх вмісту в бджолиному обніжжі та, видно, в тканинах медоносних бджіл і бджолиній продукції, отриманих у передгірній та, особливо, в лісостеповій зонах Карпатського регіону. Все це є

наслідком більшої урбанізації та індустріалізації наведених вище територій.

Слід відзначити, що в лісостеповій зоні Карпатського регіону, порівняно з гірською, в бджолиному обніжжі є досить високий вміст пробіотичних Цинку, Купруму, Кобальту. Наведені вище важкі метали в допустимих кількостях вкрай необхідні для нормальної життєдіяльності бджіл. Але підвищений в бджолиному обніжжі рівень

токсичних Плюмбуму та Кадмію видно здатний нівелювати позитивний вплив на організм бджіл. Дані літератури вказують на те, що хоча Цинк, Купрум, Кобальт, Плюмбум і Кадмій є двовалентними мінеральними елементами, але між ними є велика конкуренція за рівнем впливу на рослини та тваринні тканини (Borsuk G., Sulborska F., Stawiarz E., Olszewski K., Wiącek D., Ramzi N., Nawrocka A., Jędryczka M., 2021; Costa A., Veca M., Barberis M., Cicerinegri L., Tangorra F. M., 2021). Так, підвищений рівень токсичних Плюмбуму та Кадмію здатний нівелювати позитивний вплив пробіотичних важких металів на згадані тканини (Di N., Zhang K., Hladun K. R., Rust M., Chen Y.-F., Zhu Z.-Y., Liu T.-X., Trumble J. T., 2020; Costa A., Veca M., Barberis M., Cicerinegri L., Tangorra F. M., 2021).

Було зафіксовано, що високий рівень важких металів у бджолиному обніжжі в свою чергу є причиною зростання їх вмісту в тканинах

медоносних бджіл. При цьому в тканинах черевця медоносних бджіл передгірної й особливо лісостепової зон, порівняно з умовно чистим гірським довкіллям (163,76 г·10⁻³/кг сирової маси і 191,91 проти 127,61 г·10⁻³/кг сирової маси), є більший сумарний вміст досліджуваних важких металів (табл. 2, 3).

Особливо вагомо в тканинах черевця медоносних бджіл передгірної й лісостепової зон, порівняно з умовно чистим гірським довкіллям, підвищується рівень небезпечних елементів першого класу токсичності – Плюмбуму (у 1,38–1,70 рази) та Кадмію (у 1,78–2,33 рази). Також помітно збільшується концентрація елемента другого класу токсичності – Хрому (у 1,28–1,56 разів). Ці метали мають сильний, в основному негативний, вплив на тканини медоносних бджіл (Gizaw G., Kim Y. H., Moon K. H., Choi J. B., Kim Y., Park J. K., 2020).

Таблиця 2. Вміст важких металів, у тому числі токсичних, в тканинах черевця медоносних бджіл у різних природних зонах Карпатського регіону, г·10⁻³/кг сирової маси (M±m, n=3)

Метал та його символ	Природні зони Карпатського регіону		
	Гірська	Передгірна	Лісостепова
Ферум, Fe	46,48±1,046	63,72±1,220***	77,03 ±1,630***
Цинк, Zn	77,08±1,190	91,32±1,536**	104,24±2,060***
Купрум, Cu	0,34±0,012	0,47±0,014**	0,59±0,014***
Кобальт, Co	0,31±0,009	0,36±0,014*	0,43±0,017**
Хром, Cr	2,43±0,070	3,12±0,082*	3,78±0,112**
Нікол, Ni	2,43±0,035	3,40±0,067***	4,13±0,059***
Плюмбум, Pb	0,88±0,035	1,21±0,038**	1,50±0,046***
Кадмій, Cd	0,09±0,009	0,16±0,006**	0,21±0,012**

Таблиця 3. Вміст важких металів, у тому числі токсичних, в свіжопобудованих бджолиних стільниках (язиках) в різних природних зонах Карпатського регіону, г·10⁻³/кг натуральної маси (M±m, n=3)

Метал та його символ	Природні зони Карпатського регіону		
	Гірська	Передгірна	Лісостепова
Ферум, Fe	21,31±0,425	41,02±2,682*	84,11±2,523*
Цинк, Zn	2,13±0,125	5,01±0,158**	8,10±0,255**
Купрум, Cu	0,06±0,005	0,12±0,003**	0,15±0,006**
Кобальт, Co	0,03±0,003	0,12±0,006**	0,18±0,003**
Хром, Cr	0,85±0,010	1,19±0,035**	1,36±0,023**
Нікол, Ni	0,32±0,005	0,53±0,020*	0,75±0,020**
Плюмбум, Pb	0,42±0,003	0,64±0,025*	0,94±0,047**
Кадмій, Cd	0,02±0,047	0,05±0,073*	0,07±0,006*

Встановлено також, що високий рівень важких металів у бджолиному обніжжі є причиною зростання їх вмісту в бджолиній продукції. Зокрема, в свіжопобудованих бджолиних стільниках (язиках) передгірної й особливо лісостепової зон, порівняно з умовно чистим гірським довкіллям, зростає вміст Плюмбуму (відповідно в 1,52 і 2,24 рази) та Кадмію (відповідно в 2,00 і 3,50 рази). При цьому концентрація Хрому збільшується відповідно в 1,40 і 1,60 рази.

Одночасно в наведеному вище напрямку сильно зростають коефіцієнти переходу Феруму, Цинку, Купруму, Хрому, Ніколу та особливо Плюмбуму й Кадмію з бджолиного обніжжя; Феруму, Цинку, Кобальту, Ніколу та особливо Плюмбуму й Кадмію з тканин черевця (табл. 4 і 5).

Представляє інтерес той факт, що при цьому в наведеному вище напрямку сильно знижується коефіцієнт переходу Хрому з бджолиного обніжжя в бджолині стільники. Слід відзначити, що коефіцієнт переходу Хрому з тканин черевця в

бджолині стільники є високим тільки в передгірній зоні Карпатського регіону, бо вже у лісостеповій зоні даний коефіцієнт переходу не зростає.

Наведене вище вказує на те, що бджолине обніжжя через травний канал і його стінку та далі через лімфу має сильний вплив на коефіцієнти переходу та вміст важких металів у бджолиних стільниках. Видно, до цього процесу прямо причетні воскосинтезувальні залози робочих бджіл.

Як відомо, бджолині стільники будують дуже молоді робочі бджоли, яким від сили півтора два з половиною тижні життя, та які харчуються бджолиним обніжжям і медом (Fedak V. V., 2022).

Причому, на активність воскосинтезувальних залоз молодих робочих бджіл бджолине обніжжя, порівняно з медом, має більш значний вплив. Ці дані дають відповідь на питання звідки в свіжопобудованих стільниках беруться важкі метали, в тому числі токсичні Плюмбум і Кадмій.

Таблиця 4. Коефіцієнти переходу важких металів, у тому числі токсичних, із бджолиного обніжжя в свіжопобудовані бджолині стільники в різних природних зонах Карпатського регіону

Метал та його символ	Природні зони Карпатського регіону		
	Гірська	Передгірна	Лісостепова
Ферум, Fe	0,640	1,112	2,020
Цинк, Zn	0,062	0,160	0,170
Купрум, Cu	0,030	0,040	0,100
Кобальт, Co	0,079	0,105	0,125
Хром, Cr	0,350	0,237	0,204
Нікол, Ni	0,037	0,815	1,014
Плюмбум, Pb	0,325	3,556	3, 615
Кадмій, Cd	0,200	0,571	0,700

Потрібно відзначити наступне. Високі коефіцієнти переходу з бджолиного обніжжя в бджолині стільники мають Ферум, Нікол і особливо Плюмбум; середні – Цинк, Кобальт, Хром і Кадмій; низькі – Купрум (табл. 4). Високі коефіцієнти переходу з тканин черевця в бджолині стільники мають Плюмбум і особливо Ферум; середні – Купрум, Кобальт, Хром, Нікол і Кадмій; низькі – Цинк. Видно, організм бджоли може в деякій мірі регулювати міжтканинний перехід важких металів.

Це підтверджується наступними фактами. Високі коефіцієнти переходу з бджолиного обніжжя та тканин черевця в бджолині стільники Феруму, Ніколу та особливо Плюмбуму можуть

свідчити про те, що організм бджоли таким чином може в деякій мірі звільнятися від менш потрібних йому мінеральних елементів, переводячи їх в склад бджолиних стільників.

Низькі або середні коефіцієнти переходу в бджолині стільники найбільш пробіотичних мінеральних елементів Цинку, Купруму та Кобальту можуть вказувати на те, що в складі воску вони зовсім не потрібні. Високі коефіцієнти переходу з бджолиного обніжжя та тканин черевця в бджолині стільники Плюмбуму очевидно зумовлені звільненням організму бджоли від цього токсичного мінерального елементу.

Квітковий нектар є основою для формування з нього меду та відкладання його

бджолами в стільники. Видно квітковий нектар у досліджуваних нами природних зонах Карпатського регіону має подібну пилку здатність нагромаджувати в собі важкі метали. Встановлено, що в натуральних поліфлорних медах, відібраних із вуликів, розміщених у передгірній і особливо лісостеповій зонах Карпатського регіону, порівняно з гірською, впродовж літнього періоду є вірогідно більший вміст Феруму, Цинку, Купруму,

Кобальту, Хрому й Ніколу та токсичних Плюмбуму і Кадмію (табл. 6). При цьому в цих медах спостерігаються тільки слідові кількості дуже токсичного елемента Арсену. Але, слід відмітити, більший вміст наведених вище важких металів у досліджуваних медах згідно вимог чинного Національного стандарту ДСТУ 4497:2005 знаходиться в допустимих межах

Таблиця 5. Коефіцієнти переходу важких металів, у тому числі токсичних, із тканин черевця медоносних бджіл у свіжопобудовані бджолині стільники в різних природних зонах Карпатського регіону

Метал та його символ	Природні зони Карпатського регіону		
	Гірська	Передгірна	Лісостепова
Ферум, Fe	0,458	0,644	1,092
Цинк, Zn	0,028	0,055	0,078
Купрум, Cu	0,176	0,256	0,254
Кобальт, Co	0,097	0,333	0,343
Хром, Cr	0,132	0,301	0,360
Нікол, Ni	0,132	0,156	0,182
Плюмбум, Pb	0,477	0,529	0,627
Кадмій, Cd	0,222	0,323	0,333

Таблиця 6. Вміст важких металів, у тому числі токсичних, у натуральних поліфлорних медах, відібраних на початку літнього періоду з вуликів, розміщених в різних природних зонах Карпатського регіону, $г \cdot 10^{-3} / кг$ натуральної маси ($M \pm m$, $n=3$)

Метал та його символ	Природні зони Карпатського регіону		
	Гірська	Передгірна	Лісостепова
Ферум, Fe	2,36 $\pm$ 0,081	2,64 $\pm$ 0,026*	2,75 $\pm$ 0,028*
Цинк, Zn	2,34 $\pm$ 0,029	2,72 $\pm$ 0,036*	2,82 $\pm$ 0,034*
Купрум, Cu	0,19 $\pm$ 0,011	0,23 $\pm$ 0,006*	0,28 $\pm$ 0,030*
Кобальт, Co	0,15 $\pm$ 0,018	0,22 $\pm$ 0,012*	0,26 $\pm$ 0,009***
Хром, Cr	0,15 $\pm$ 0,012	0,21 $\pm$ 0,009*	0,24 $\pm$ 0,007**
Нікол, Ni	0,17 $\pm$ 0,007	0,23 $\pm$ 0,012*	0,26 $\pm$ 0,017**
Плюмбум, Pb	0,19 $\pm$ 0,003	0,25 $\pm$ 0,012*	0,26 $\pm$ 0,006**
Кадмій, Cd	0,15 $\pm$ 0,012	0,21 $\pm$ 0,015*	0,23 $\pm$ 0,003**
Арсен, As	Сліди	Сліди	Сліди

Високий рівень Феруму, Цинку, Купруму, Кобальту, Хрому, Ніколу, Плюмбуму та особливо Кадмію у бджолиному обніжжі та в тканинах бджіл може негативно впливати на працездатність робочих бджіл та відтворну здатність трутнів і бджолиних маток, які утримуються у вуликах,

розміщених у згадуваних зонах Карпатського регіону. Зокрема, високий рівень згадуваних вище важких металів у бджолиному обніжжі в передгірній та особливо в лісостеповій зоні Карпатського регіону вагомо призводить до зниження льотно-збиральної активності робочих

бджіл щодо бджолоиноного обніжжя та меду (патенти України на корисну модель № 152753, 153302 і 160983).

Виходячи з наведеного вище для збільшення льотно-збиральної активності робочих бджіл щодо меду та покращення його якісних показників слід розмішувати пасіки на територіях, які найменше забруднені важкими металами, насамперед такими токсичними, як Плюмбум і особливо Кадмій.

З цією ж метою пасіки також можна вивозити поближче до гірських територій, котрі впродовж весняно-літнього періоду знизу до самого верху вкриті рослинністю, серед якої значна кількість знаходиться в стадії цвітіння (Kryvyi M. M., Zhukovets O. I., Dikhtiar O. O., 2018). До того ж, мед, отриманий на гірських територіях характеризується вищими якісними показниками і тому є високоцінним (Gizaw G., Kim Y. H., Moon K. H., Choi J. B., Kim Y. H., Park J. K., 2020; El-Seedi H. R., Eid N., Abd El-Wahed A. A., Rateb M. E., Afifi H. S., Algethami A. F., Zhao C., Al Naggat Y., Alsharif S. M., Tahir H. E., Xu B., Wang K., Khalifa S.A.M., 2022).

Встановлено, що інтенсивність яйцекладки бджолиних маток, які утримуються у вуликах, розміщених у передгірній та особливо в лісостеповій зонах Карпатського регіону, порівняно з бджолиними матками гірської зони, впродовж весняно-літнього періоду є меншою.

Зниження інтенсивності яйцекладки бджолиних маток, які утримуються у вуликах,

Висновки

У передгірній та особливо в лісостеповій зонах Карпатського регіону, порівняно з умовно чистим гірським довкіллям, є більший вміст Феруму, Цинку, Купруму, Кобальту, Хрому, Ніколу та найбільший токсичних Плюмбуму і Кадмію у бджолоиному обніжжі, тканинах бджіл, свіжопобудованих бджолиних стільниках (язиках) та в натуральних поліфлорних медах.

Перевищення гранично допустимої концентрації в 1,1 рази виявлено лише щодо рівня Плюмбуму та Кадмію в бджолоиному обніжжі лісостепової зони.

Високий рівень Феруму, Цинку, Купруму, Кобальту, Хрому, Ніколу та особливо токсичних Плюмбуму і Кадмію у тканинах бджіл передгірної й найбільше лісостепової зон Карпатського регіону

Список використаної літератури

Vozhehova R. A., Vlashchuk A. M., Drobit O. S. Improving the ecological and land reclamation condition of soils on the basis of smart specialization. *Materialy vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii molodykh vchenykh «aktualni problemy ahropromyslovoho vyrobnytstva ukraïny: stalnyi rozvytok silskoho hospodarstva v umovakh zmin klimatu»*, s. Obroshyno, 11 lystopada 2021 r. Lviv-Obroshyno. 2021. P. 15–16.

розміщених у передгірній та особливо в лісостеповій зонах Карпатського регіону, порівняно з бджолиними матками гірської зони, в подальшому, через зменшення кількості робочих бджіл, може вкрай негативно впливати на продуктивні та відтворні ознаки бджолоиної сім'ї.

Зниження інтенсивності яйцекладки бджолиних маток видно є інтегрованим показником впливу екологічного стану довкілля, оскільки останнє також рівнозначно впливає на відтворну здатність трупнів, зокрема на їх кількісні та якісні показники спермопродукції. На такий же негативний вплив територій, забруднених важкими металами, на репродуктивні ознаки бджіл вказують також інші вчені (Di Fiore C., Nuzzo A., Torino V., De Cristofaro A., Notardonato I., Passarella S., Di Giorgi S., Avino P., 2022).

Виявлено, що медова продуктивність бджолосімей в гірській зоні Карпатського регіону є найвищою, у передгірній – середньою, а в лісостеповій – найнижчою.

Бджолине обніжжя, тканини бджіл, свіжопобудовані бджолині стільники (язики) та натуральні поліфлорні меди за вмістом у них важких металів, у тому числі токсичних Плюмбуму і Кадмію, можуть служити біоіндикаторами екологічного стану довкілля (Komarova I., 2018; Di Fiore C., Nuzzo A., Torino V., De Cristofaro A., Notardonato I., Passarella S., Di Giorgi S., Avino P. 2022).

негативно впливає на відтворну здатність бджолиних маток і продуктивні ознаки робочих бджіл.

Виникає необхідність в пошуках засобів зменшення шкодочинного впливу великої кількості важких металів, насамперед токсичних Плюмбуму і Кадмію, в тканинах медоносних бджіл лісостепової зони Карпатського регіону на їх відтворні та продуктивні ознаки.

Бджолине обніжжя, тканини бджіл, свіжопобудовані бджолині стільники (язики) та натуральні поліфлорні меди за вмістом у них важких металів, у тому числі токсичних Плюмбуму і Кадмію, можуть служити біоіндикаторами екологічного стану довкілля.

Zastavnyi F. Ukraine. Nature, population, economy. Lviv : Apriori, 2011. 504 p.

Kovka N. O., Nedashkevskyi V. M. Duration and flowering periods of the main nectar-pollinators in the conditions of the right-bank forest-steppe. *Tvarynnystvo Ukrainy*. 2019. No 4. P. 36–39.

Kryvyi M. M., Zhukovets O. I., Dikhtiar O. O. Assessment of honey resources of forest ecosystems based on their typology. *Ahrarna nauka. Hodivlia*

tvaryn ta kharchovi tekhnologii kormiv. 2018. Issue 2(101). P. 34–43.

Laboratorni metody doslidzhen u biolohii, tvarynnyystvi ta veterynarnii medytsyni: dovidnyk / Vlizlo V. V. et al. Lviv, 2012. 759 p.

Metodolohiia ta orhanizatsiia naukovykh doslidzhen u tvarynnyystvi: posibnyk / za red. I. I. Ibatullina, O. M. Zhukorskoho. Kyiv: Ahrarna nauka, 2017. 328 p.

Environment (Statistical information). Main Department of Statistics in Lviv Region. URL: https://www.lv.ukrstat.gov.ua/ukr/si/metod_15.php?ind_page=si&vid=1&ozn_news=46&c ode=22&show2=1

Nedashkivskyi V. M., Razanov S. F. The effect of spring replenishment of bee colonies' food reserves on their production of flower pollen, perga, and drone larva homogenate. *Visnyk Poltavskoi derzhavnoi ahrarnoi akademii.* 2020. No 4. P. 157–162.

Patent № 153202 Ukraina, A23K 50/90, A01K 67/033. Method for increasing the flight-harvesting and honey productivity of worker bees / Y. F. Ravis, V. O. Postoienko, O. F. Stasiv, I. I. Saranchuk, O. Ya. Klym, O. B. Diachenko, O. I. Stadnytska, V. D. Fedak, V. M. Bratiuk; Zaiavnyk i patentovlasnyk Instytut silskoho hospodarstva Karpatskoho rehionu NAAN. Zaiavka № u 2021 06464; Zaiavl. 16. 11. 2021; Publ. 07.06.2023, Biul. No 23. 6 p.

Patent № 152753 Ukraina, A23K 50/90, A01K 67/033. A method for increasing honey productivity of worker bees / Y. F. Ravis, V. O. Postoienko, O. F. Stasiv, I. I. Saranchuk, O. Ya. Klym, O. B. Diachenko, O. I. Stadnytska, V. D. Fedak. Zaiavnyk i patentovlasnyk Instytut silskoho hospodarstva Karpatskoho rehionu NAAN. Zaiavka № u 2021 06463; Zaiavl. 16. 11. 2021; Publ. 12.04.2023, Biul. No 15. 6 p.

Patent № 160983 Ukraina, A01K 67/368, A01K 10/30, A01K 20/20, A23K 50/90. A method for increasing honey productivity of worker bees / Y. F. Ravis, V. O. Postoienko, I. I. Saranchuk, O. Ya. Klym, O. B. Diachenko, O. I. Stadnytska, V. D. Fedak, V. M. Bratiuk, Hutyi B. V., Usenko S. O., Bezalychna O. O., Kibenko N. Yu., Shevchenko O. B., Fediaieva A. S., Hurko Ye. Yu.; Zaiavnyk i patentovlasnyk Instytut silskoho hospodarstva Karpatskoho rehionu NAAN. Zaiavka № u 2024 019633; Zaiavl. 15. 04.. 2024; Publ. 29.10.2025, Biul. No 44. 6 p.

Razanov S. F., Didur I. M., Pervachuk M. V. Efficiency of reducing soil contamination with lead and cadmium by bee pollination of agricultural crops under conditions of their mineral fertilization. *Sil'ske hospodarstvo ta lisivnyystvo : zb. nauk. pr. VNAU.* 2015. No 2. P. 94–101.

Statystychnyi shchorichnyk Lvivskoi oblasti za 2012 rik. Lviv : Holovne upravlinnia statystyky u Lvivskii oblasti, 2013. Part II. 271 p.

Saranchuk I. I. Level of non-esterified fatty acids in abdominal tissues and productive traits of bees

fed different amounts of linseed oil. *Peredhirne ta hirske zemlerobstvo i tvarynnyystvo.* 2020. Issue 67 (II). P. 253–264.

Fedak V. V. The influence of feed quality on the development of the wax gland in honey bees (*Apis mellifera* L.). *Bdzhilnyystvo Ukrainy.* 2022. Issue 9, No 15. P. 109–113.

Borsuk G., Sulborska F., Stawiarz E., Olszewski K., Wiącek D., Ramzi N., Nawrocka A., Jędrzycka M. Capacity of honeybees to remove heavy metals from nectar and excrete the contaminants from their bodies. *Apidologie.* 2021. Vol. 52. P. 1098–1111. <https://doi.org/10.1007/s13592-021-00890-6>

Briffa J., Sinagra E., Blundell R. Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans. *Heliyon.* 2020. Vol. 6. Issue 9. P. 1–26. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04691>

Costa A., Veca M., Barberis M., Cicerone L., Tangorra F. M. Predicting atmospheric cadmium and lead using honeybees as atmospheric heavy metals pollution indicators. Results of a monitoring survey in Northern Italy. *Italian Journal of Animal Science.* 2021. Vol. 20, Issue 1. P. 850–858.

Di Fiore C., Nuzzo A., Torino V., De Cristofaro A., Notardonato I., Passarella S., Di Giorgi S., Avino P. Honeybees as Bioindicators of Heavy Metal Pollution in Urban and Rural Areas in the South of Italy. *Atmosphere.* 2022. Vol. 13, № 624. P. 1–12. <https://doi.org/10.3390/atmos13040624>

Di N., Zhang K., Hladun K. R., Rust M., Chen Y.-F., Zhu Z.-Y., Liu T.-X., Trumble J. T. Joint effects of cadmium and copper on *Apis mellifera* forgers and larvae. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology.* 2020. Vol. 237. P. 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2020.108839>

Gizaw G., Kim Y. H., Moon K. H., Choi J. B., Kim Y. H., Park J. K. Effect of environmental heavy metals on the expression of detoxification-related genes in honey bee *Apis mellifera*. *Apidologie.* 2020. Vol. 51. P. 664–674. Doi: 10.1007/s13592-020-00751-8

El-Seedi H. R., Eid N., Abd El-Wahed A. A., Rateb M. E., Afifi H. S., Algethami A. F., Zhao C., Al Naggari Y., Alsharif S. M., Tahir H. E., Xu B., Wang K., Khalifa S.A. M. Honey Bee Products: Preclinical and Clinical Studies of Their Anti-inflammatory and Immunomodulatory Properties. *Front. Nutr.* 2022. Vol. 8. doi: 10.3389/fnut.2021.761267 frontiersin.org/articles/10.3389/fnut.2021.761267/full

Giri S., Rule D. C., Dillon M. E. Fatty acid composition in native bees: Associations with thermal and feeding ecology. *Comparative Biochemistry and Physiology, Part A.* 2018. Vol. 218. P. 70–79. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2018.01.013>

Hsu P.-S., Wu T.-H., Huang M.-Y., Wang D.-Y., Wu M.-C. Nutritive Value of 11 Bee Pollen Samples from Major Floral Sources in Taiwan. *Foods.* 2021. Vol. 10, Issue 9, P. 2229–2244. <https://doi.org/10.3390/foods10092229>

Klym O., Stadnytska O. Heavy metals in the dandelion and apple tree pollen from the different terrestrial ecosystems of the Carpathian region. *Acta Scientiarum Polonorum Zootechnica*. 2019. Vol. 18, № 3. S. 15-20.

Komarova I. Taraxacum officinale as bioindicator of heavy metal accumulation in soil. *Danish Scientific Journal (DSJ). Istedgade 1041650 København V Denmark*. 2018. № 8. P. 10–12. (site: <http://www.danish-journal.com>).

Mărgăoan R., Özkök A., Keskin Ş., Mayda N., Urcan A. C., Cornea-Cipcigan M. Bee collected pollen as a value-added product rich in bioactive compounds and unsaturated fatty acids: A comparative study from Turkey and Romania. *LWT*. 2021. Vol. 149.

<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111925>: sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0023643821010781

Matin G., Kargar N., Buyukisik H. B. Biomonitoring of cadmium, lead, arsenic and mercury in industrial districts of Izmir, Turkey by using honey bees, propolis and pine tree leaves. *Ecological Engineering*. 2016. Vol. 90, № 5. P. 331–335.

Takic M., Zekovic M., Terzic B., Stojasavljevic A., Mijuskovic M., Radjen S., Ristic-Medic D. Zinc Deficiency, Plasma Fatty Acid Profile and Desaturase Activities in Hemodialysis Patients: Is Supplementation Necessary? *Frontiers in Nutrition*. 2021. Vol. 8. P. 1-15. Doi:10.3389/fnut.2021.700450.

FEATURES OF THE HEAVY METALS ACCUMULATION IN HONEY BEES TISSUES AND BEE PRODUCTS

Yosyp RIVIS¹, ORCID: 0000-0002-6249-3440

Ivan SARANCHUK², ORCID: 0000-0003-4695-7804

Oleh KLYM¹, ORCID: 0000-0002-6330-8489

Olena BEZALTYCHNA⁵, ORCID: 0000-0002-4257-0699

Olha STADNYTSKA¹, ORCID: 0000-0001-6574-4068

Andrii SHELEVACH¹, ORCID: 0000-0002-7202-0911

Olha HOPANENKO³, ORCID: 0000-0003-0842-0248

Vasyl TODORIUK⁴, ORCID: 0000-0002-9902-0524

¹Institute of Agriculture of Carpathian region of NAAS

²Bukovyna State Research Station

³Andrey Krupynsky Lviv Medical Academy

⁴Institute of Animal Biology of NAAS

⁵Odessa State Agrarian University

The relevance of the proposed work is as follows. Sources of heavy metal emissions and the ways in which they enter the environment are diverse, but in general they have a technogenic origin as a result of urbanization and industrialization. Urbanization and industrialization, in particular the activities of industry, agriculture, energy and transport, as well as intensive mining – all this has led to the entry of heavy metals, including highly toxic ones (Lead, Cadmium and Arsenic) into the air, water, soil and plants).

Experimental apiaries of clinically healthy honey bees of the Carpathian breed (*Apis mellifera* (L) *carpathica*) were selected on the basis of private apiaries of the mountain (Slavsko village, Stryi district), foothill (Nyzhnia Stynava village, Stryi district) and forest-steppe zones (Myklashiv village, Lviv district) of the Lviv region.

To assess the intensity of technogenic load on the environment where the experimental apiaries of honey bees are located, the content of heavy metals in bee pollen, honey bee tissues, freshly built bee combs (tongues) and natural polyfloral honeys was determined. In addition, in each of the above natural zones of the Carpathian region, in each of the three apiaries in three hives at the beginning of the summer period, the intensity of egg laying of queen bees was studied every twelfth day for 36 days. For this purpose, measuring frames were used.

It was established that in the bee litter, which is the main food for bees, the foothill and forest-steppe zones of the Carpathian region, compared to the conditionally clean mountain zone, there is a higher content of heavy metals. From the above table it is also clear that in the bee litter of the forest-steppe zone of the Carpathian region there is the highest level of the studied heavy metals. At the same time, the content of toxic elements Lead and Cadmium in the bee litter in the above zone is 1.1 times higher than the maximum permissible concentration.

It was also established that the high level of heavy metals in the bee litter is the reason for the increase in their content in bee products. In particular, in freshly built beehives (tongues) of the foothill and especially forest-steppe zones, compared to the relatively clean mountain environment, the content of Lead increases (by 1.52 and 2.24 times, respectively) and Cadmium (by 2.00 and 3.50 times, respectively). At the same time, the concentration of Chromium increases by 1.40 and 1.60 times, respectively

Keywords: heavy metals, bees, environment, plants, bee products.

This is an open-access article under the terms of the Creative Commons

Отримано: 2.2.2026

Погоджено до друку: 14.4.2026

Опубліковано: 30.9.2026